



福州大学
FUZHOU UNIVERSITY

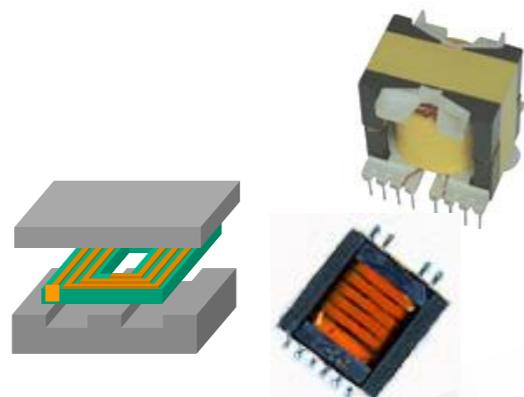
电力电子磁元件磁心材料特性 及其应用基础

福州大学功率变换电磁技术研究中心

2019.03.06



- 引言
- 磁心材料的分类
- 磁心材料的磁特性及其表征参数
- 磁心材料的损耗及其特性
- 变压器用磁芯选择依据
- 电感器用磁芯选择依据
- 滤波器用磁芯选择依据
- 不同磁心材料的组合特性
- 磁心损耗测量的挑战



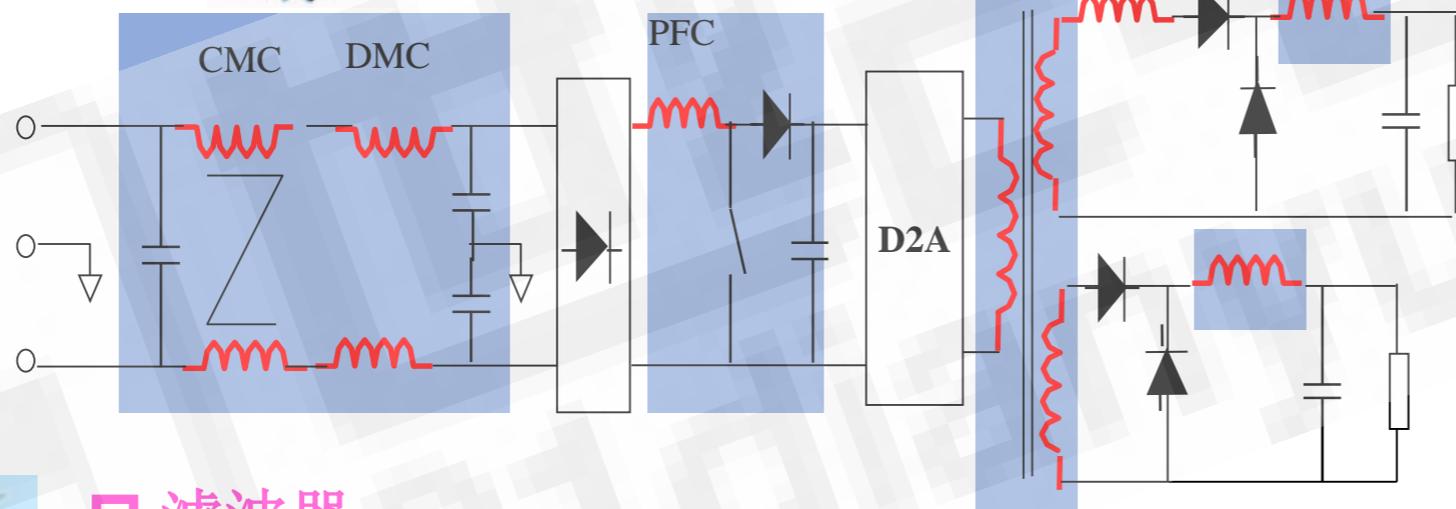
□ 变压器

- 正激变压器
- 反激变压器
- 中间抽头变压器
- 推挽变压器



□ 电感器

- 直流电感器
- 谐振电感器
- PFC电感器
- 逆变电感器



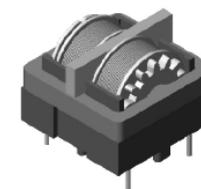
□ 滤波器

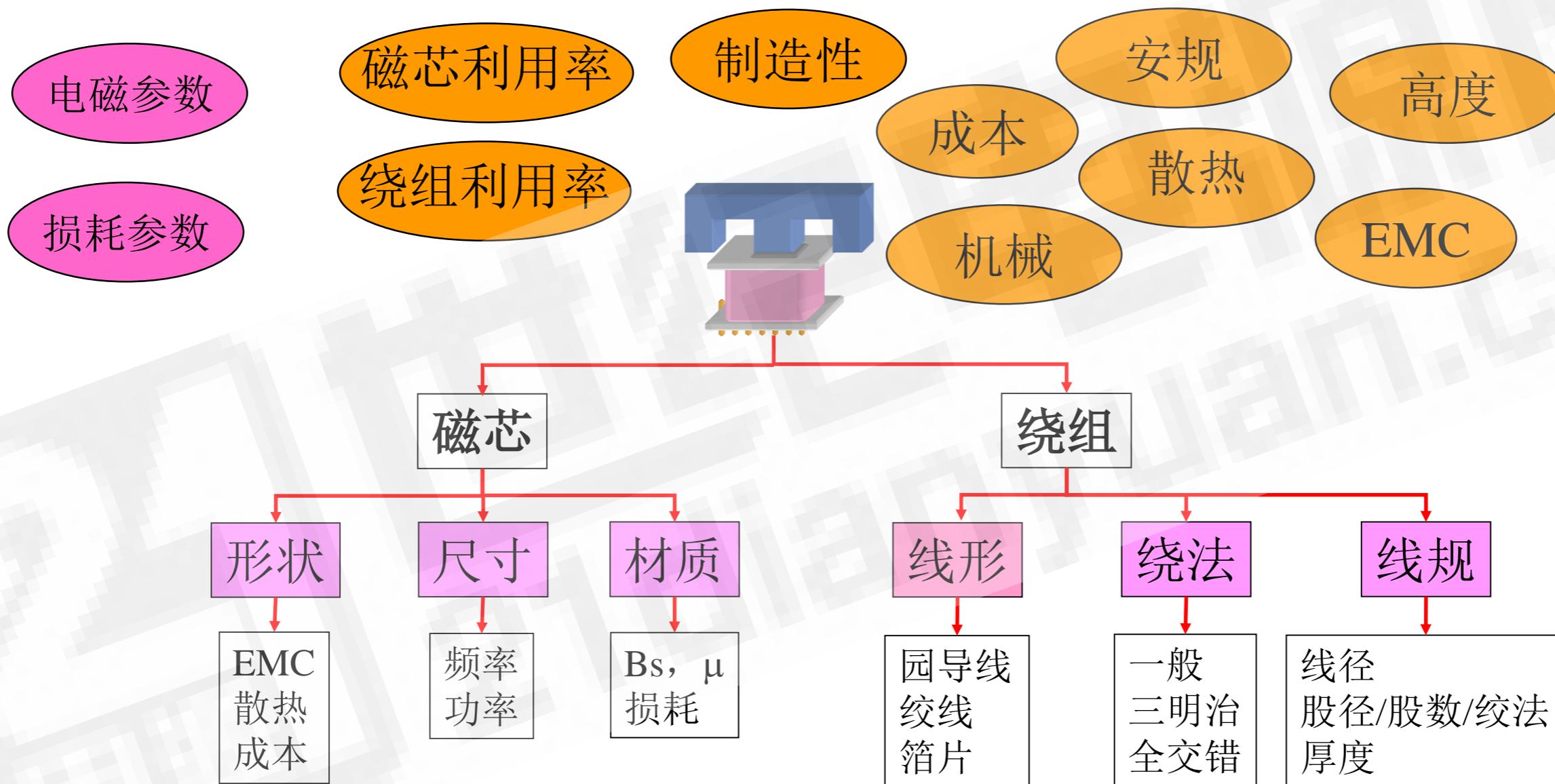
- 差模电感
- 共模电感

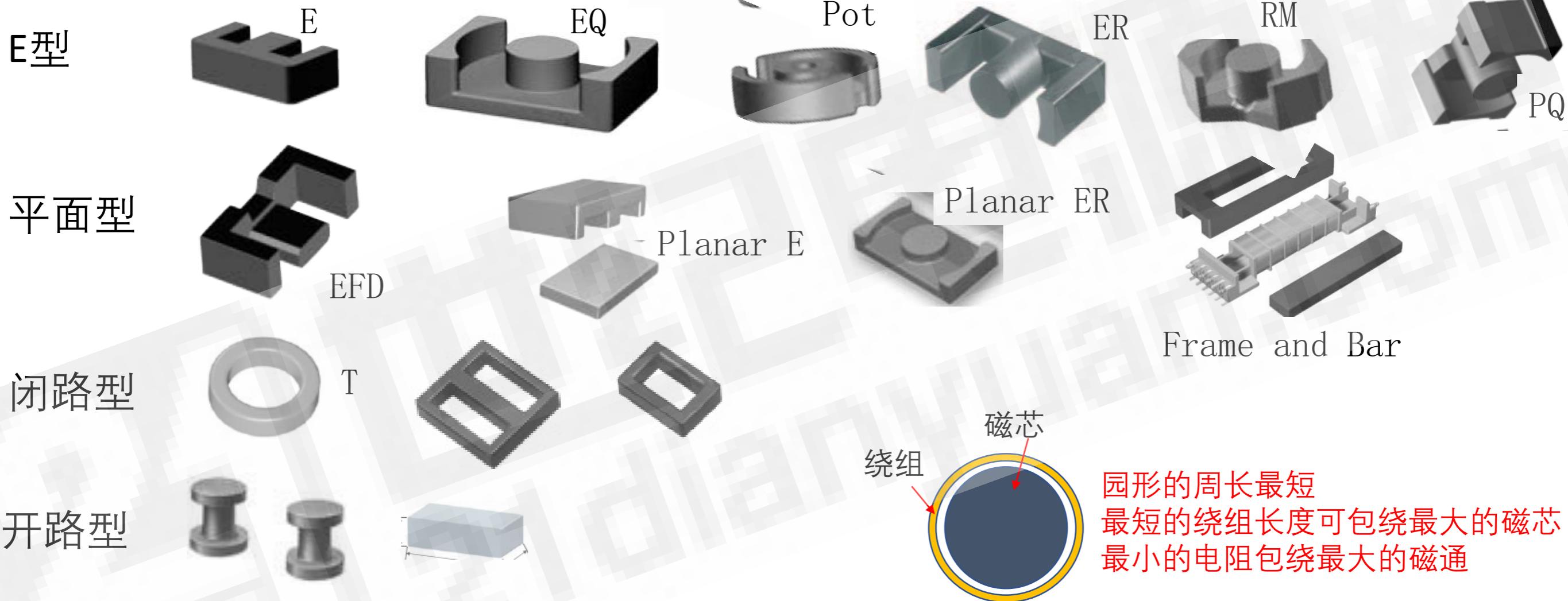


□ 集成磁件

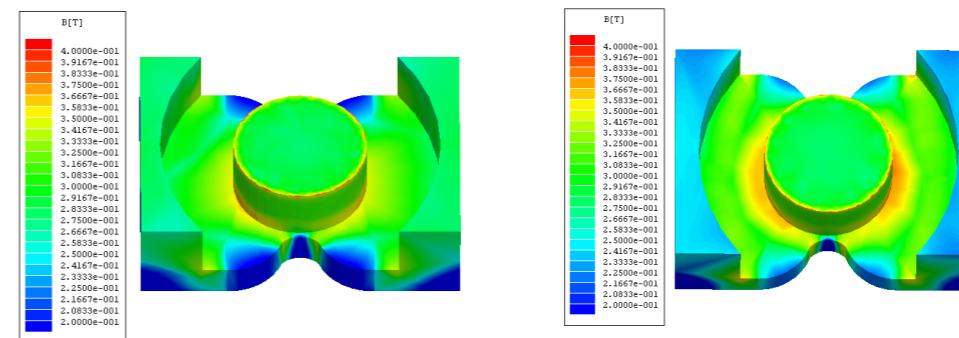
- 电感+电感
- 变压器+电感
- 变压器+变压器
- 滤波器+变压器
- 滤波器+电感
- 差共模集成电感



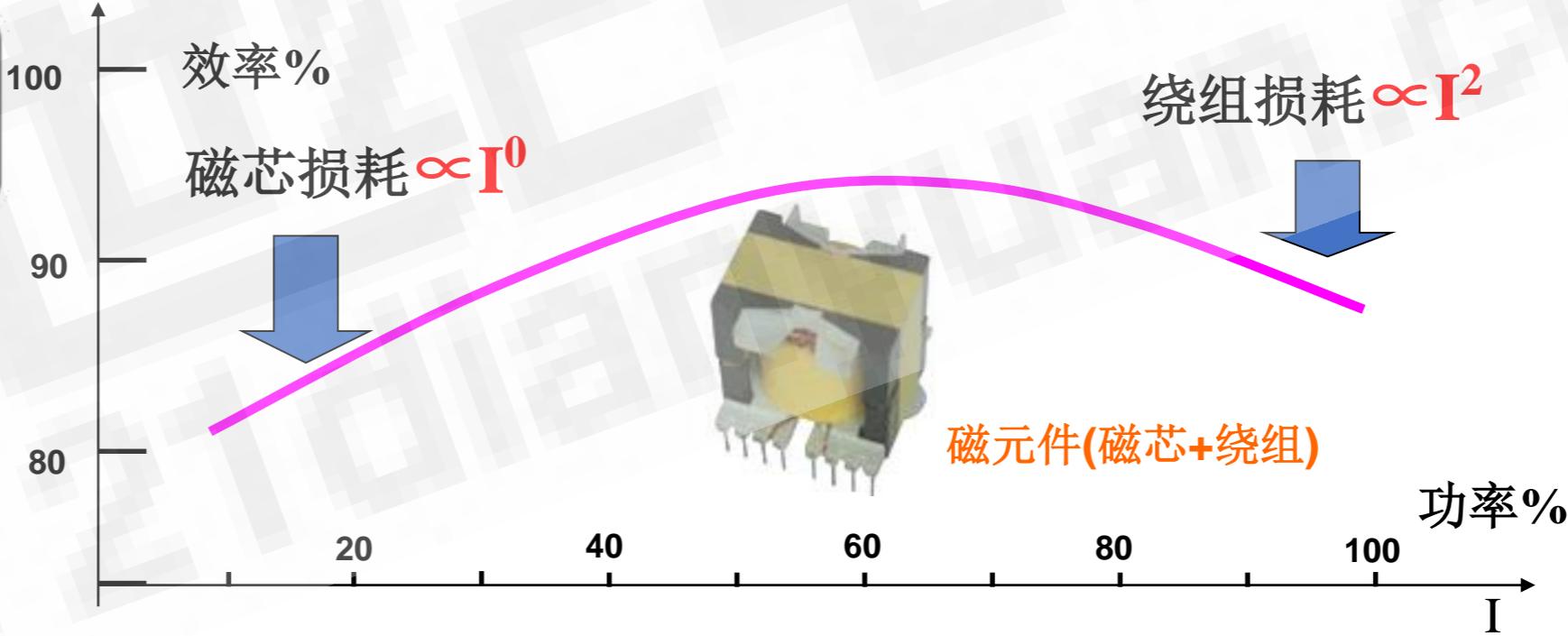
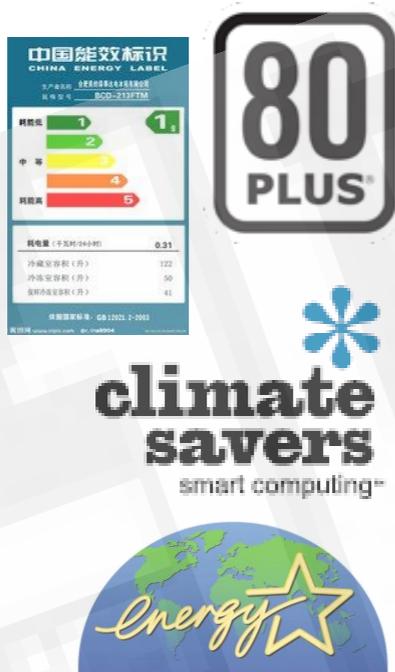
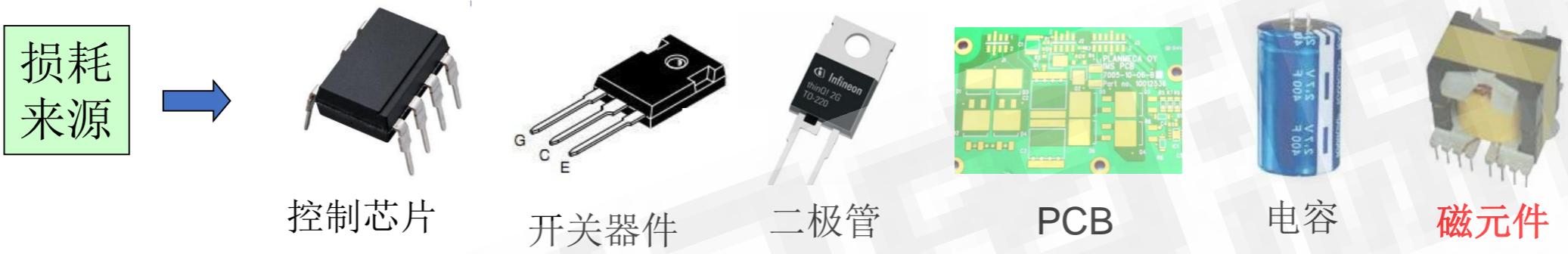




- 园形中柱是磁芯/导体利用率最高的形状
- 平面磁芯利用率很低，但高度低，散热性能好
- 磁芯形状需要兼顾工艺、散热和磁场泄露
- 磁芯中磁通密度分布尽量均匀



磁元件损耗对变换器效率特性的影响



- ❖ 磁元件损耗特性对变换器效率和能效规范具有重要影响
- ❖ 磁元件的精确损耗模型是优化设计的基础

AP法选磁芯:

$$AP = A_e A_w$$

基于传输/储存容量

磁芯总体尺寸

对变压器

$$\begin{aligned} AP &= A_e \cdot A_w \\ &= \frac{V \Delta t}{2 B_{ac} N} \cdot \frac{N_p I_{prms} + N_s I_{srms}}{JK_u} \\ &= \frac{V_{pk} D}{2 B_{ac} f N_p} \cdot \frac{N_p I_{prms}}{JK_u} + \frac{V_{spk} (1-D)}{2 B_{ac} f N_s} \cdot \frac{N_s I_{srms}}{JK_u} \\ &= \frac{V_{pk} D I_{prms} + V_{spk} (1-D) I_{srms}}{2 f \cdot B_{ac} J \cdot K_u} \end{aligned}$$

对电感器

$$\begin{aligned} AP &= A_e \cdot A_w \\ &= \frac{L \left(I_{dc} + \frac{\Delta I}{2} \right)}{N B_{max}} \cdot \frac{N I_{rms}}{JK_u} \\ &= \frac{\sqrt{2} L I_{rms}^2 \left(1 + \frac{K_{rp}}{2} \right)}{B_{max} J \cdot K_u} \end{aligned}$$

简单公式算匝数气隙:

$$\text{伏秒积 } VT = N \cdot A_e \cdot B_m \quad L_m = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot A_e}{l_a}$$

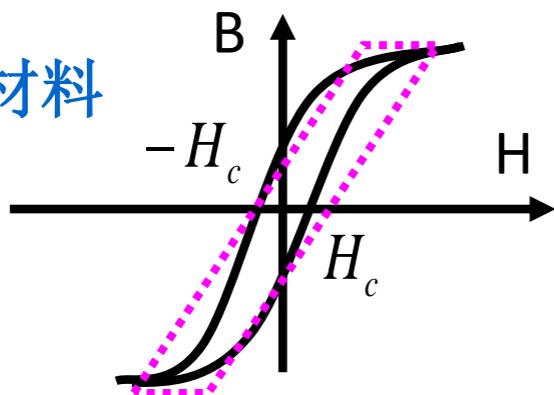
$$L \cdot I_m = N \cdot A_e \cdot B_m \quad L = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot A_e}{l_a}$$

主要局限:

- B 和 J 是关键, 但难以预先给定, 更多是凭经验和手册
- 只是选择磁芯的方法, 不是设计磁芯。
- 是基于电参数的可行计算, 不是基于损耗的设计
- 是基于经验手册的设计, 不是基于优化的设计

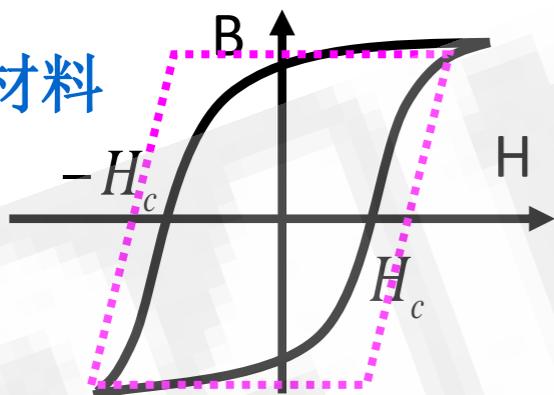
要设计好磁元件, 对磁芯的电磁特性要有充分的了解

软磁材料



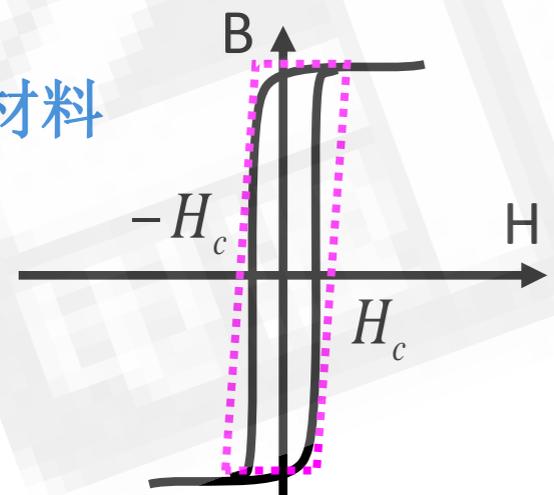
特点：易磁化(磁导率大)，易退磁(矫顽力 H_c 小)，
曲线：磁滞回线呈窄斜长形
应用：构成导磁通路 \rightarrow 用于变压器、电感器中的磁芯。

硬磁材料

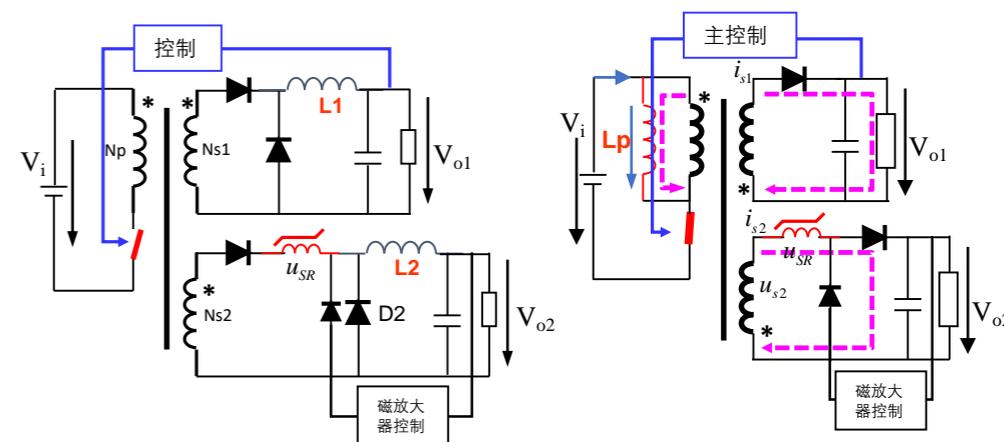
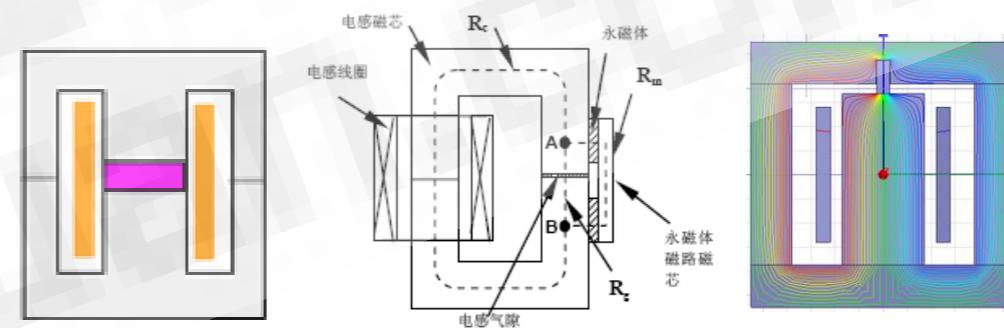


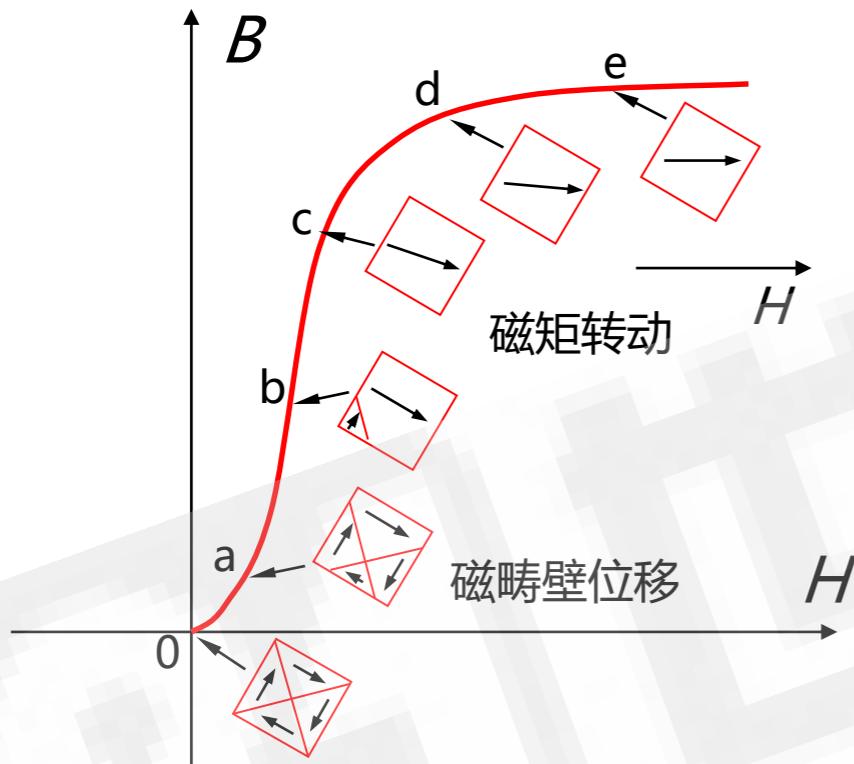
特点：难磁化(磁导率很小)，难退磁(矫顽力 H_c 大)，
曲线：磁滞回线呈矩形
应用：产生直流磁场 \rightarrow 磁电式电表、电机中永磁铁，产生直流预偏磁。

矩磁材料

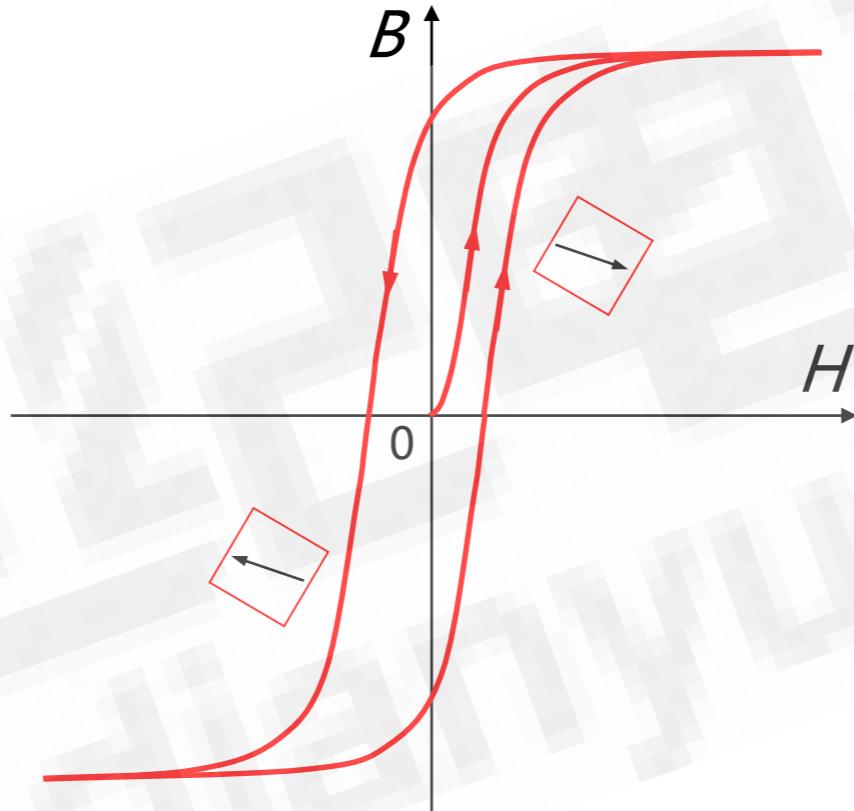


特点：易磁化(磁导率很大)，易退磁(矫顽力 H_c 小)，
曲线：磁滞回线是窄长矩形：
应用：强非线性 \rightarrow 磁放大器，饱和电感，电流尖峰抑制磁珠。

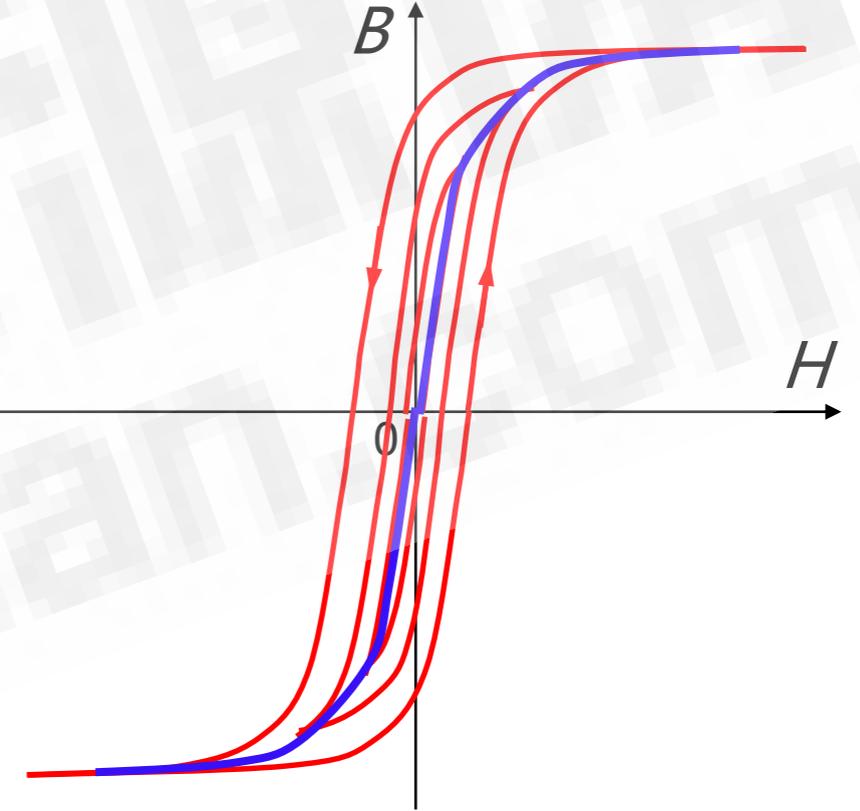




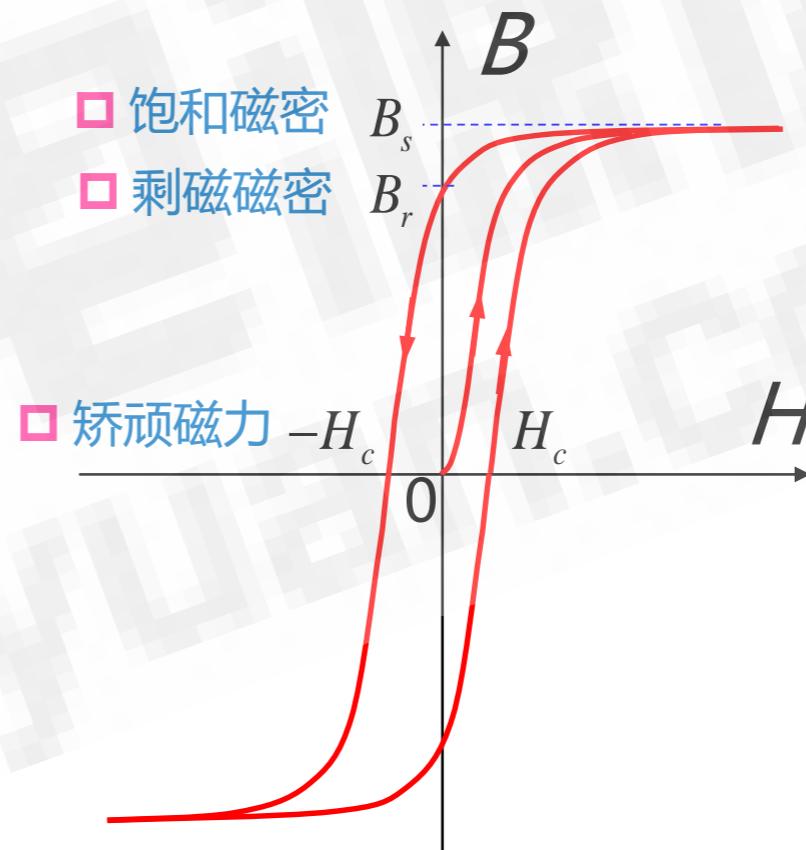
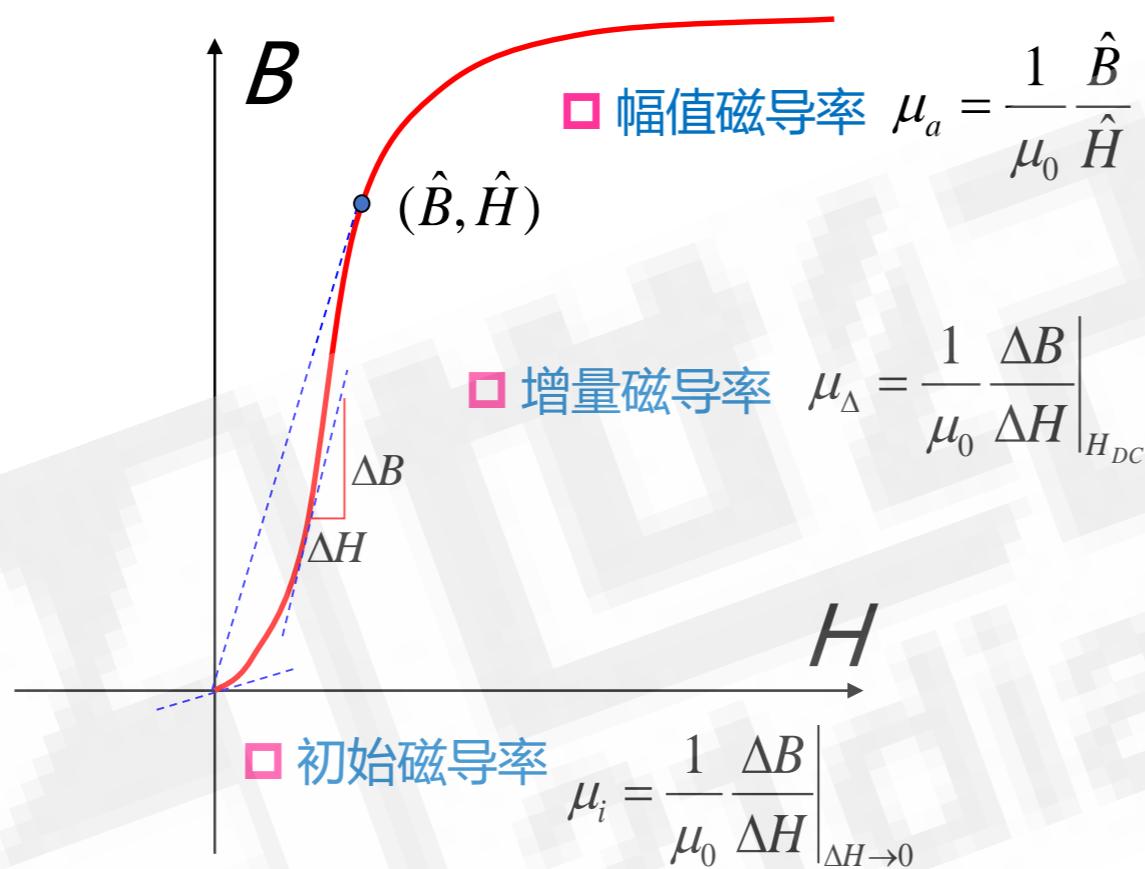
正向磁化过程曲线



双向磁滞过程曲线



基本磁化曲线

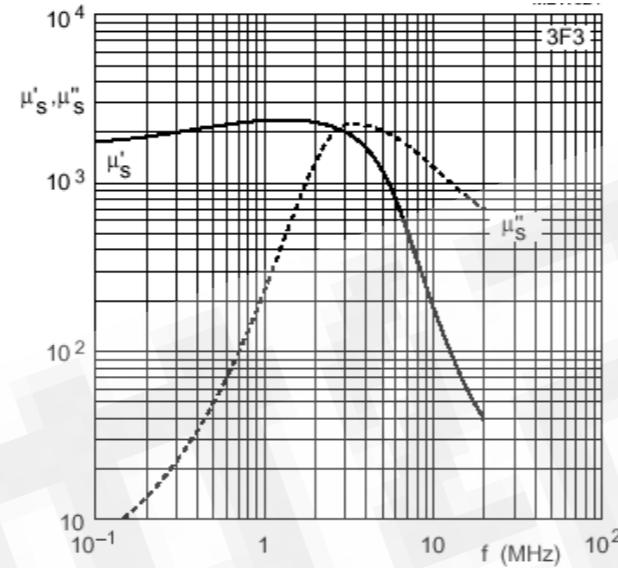


□ 复数磁导率 $\mu_s = \mu'_s - j\mu''_s$

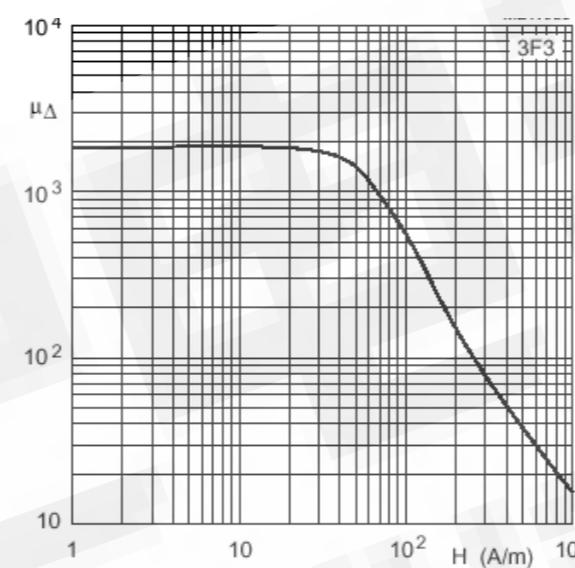
3F3 SPECIFICATIONS

SYMBOL	CONDITIONS	VALUE	UNIT
μ_i	25 °C; ≤ 10 kHz; 0.1 mT	1800 $\pm 20\%$	
μ_a	100 °C; 25 kHz; 200 mT	≈ 4000	
B	25 °C; 10 kHz; 250 A/m	≥ 400	mT
	100 °C; 10 kHz; 250 A/m	≥ 330	mT
P _v	100 °C; 100 kHz; 100 mT	≤ 80	kW/m ³
	100 °C; 400 kHz; 50 mT	≤ 150	kW/m ³
ρ	DC; 25 °C	≈ 2	Ωm
T _c		≥ 200	°C
density		≈ 4750	kg/m ³

μ with fs



$\mu\Delta$ with H_{DC}

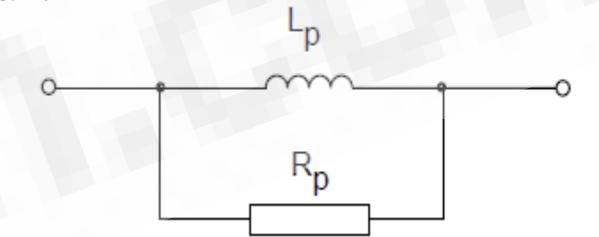


串联模型



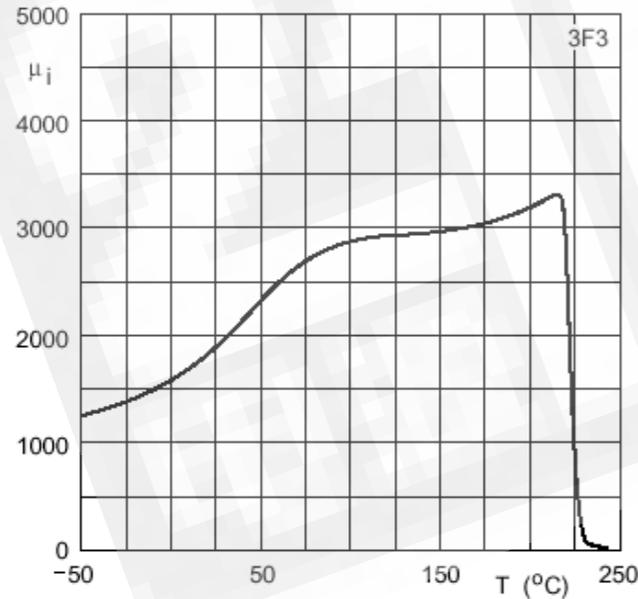
$$\bar{Z} = j\omega L_s + R_s \quad \mu = \mu'_s - j\mu''_s$$

并联模型

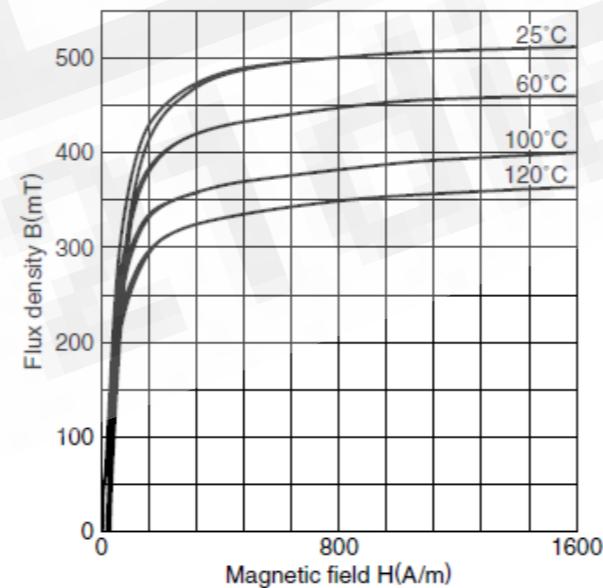


$$\bar{Z} = \frac{1}{1/(j\omega L_p) + 1/R_p} \quad \frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu'_p} - \frac{1}{\mu''_p}$$

μ_i with T



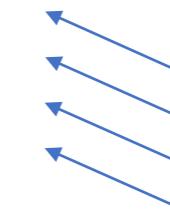
Material: PC44 Bs with T



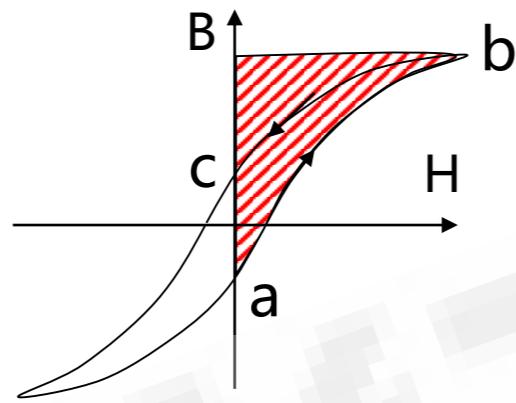
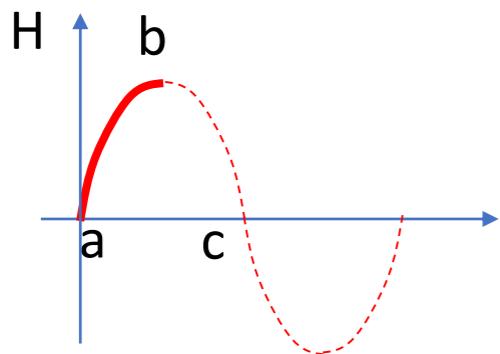
热面



冷面

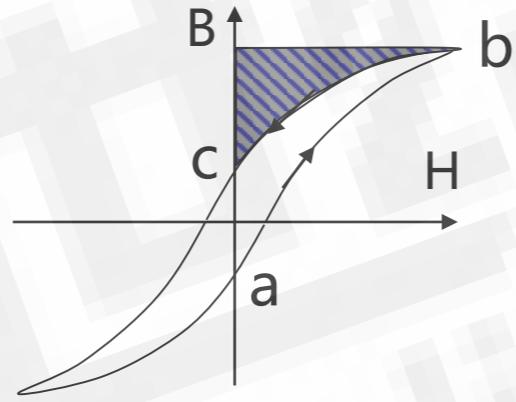
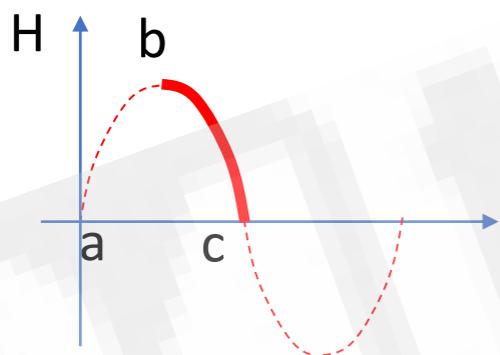


散热风



励磁阶段输入的磁能

$$E_{in} = V_e \cdot \int_a^b H \cdot dB$$



去磁阶段输出的磁能

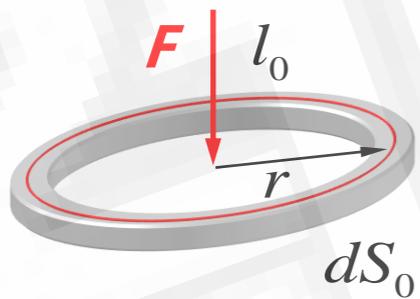
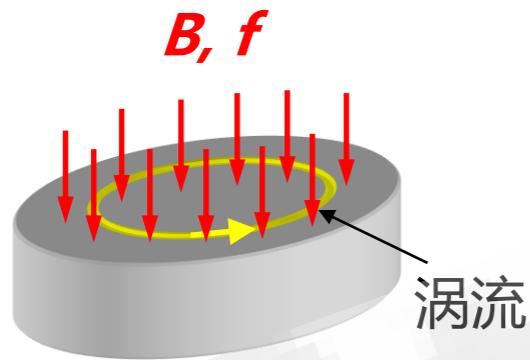
$$E_{out} = V_e \cdot \int_b^c H \cdot dB$$

一个励磁去磁
周期消耗磁能

$$E = E_{in} - E_{out} = V_e \cdot \int_{a-b-c} H \cdot dB$$

- 磁滞损耗就是磁化回线包围的面积
- 磁滞损耗大小与激磁工作频率成正比
- 磁滞损耗大小与磁通密度大小的平方成正比

由于磁性材料多少都能导电，因此存在涡流损耗。



圆环微元

圆环微元感应电动势

$$E_0 = \frac{d\Phi}{dt} = 2\pi f \cdot B \cdot \pi r^2$$

圆环微元损耗

$$dp = \frac{E_0^2}{dR_0} = \frac{4\pi^4 f^2 B^2 r^4}{\rho \frac{l_0}{dS_0}} = \frac{4\pi^4 f^2 B^2 r^4}{\rho \frac{2\pi r}{drdz}}$$

$$dp = \frac{2\pi^3 f^2 B^2 r^3}{\rho} drdz$$

总损耗

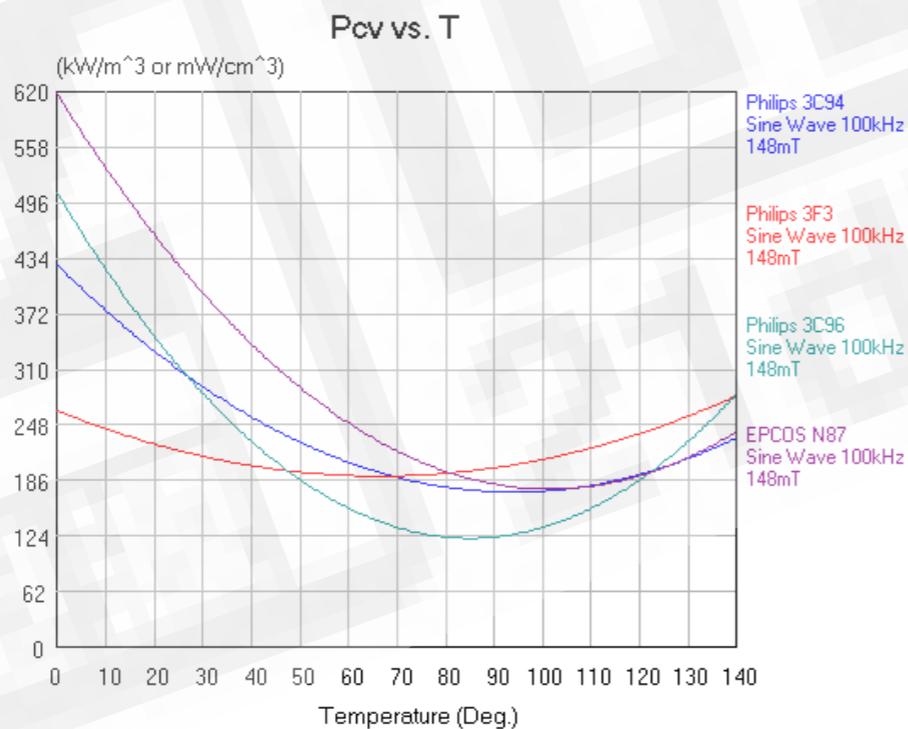
$$P = \iint dp \cdot drdz = \frac{\pi}{2} f^2 B^2 l_e A_e^2 \sigma$$

- 涡流损耗大小取决于铁磁材料本身的电导率
- 涡流损耗大小与激磁工作频率的平方成正比
- 涡流损耗大小与磁通密度大小的平方成正比

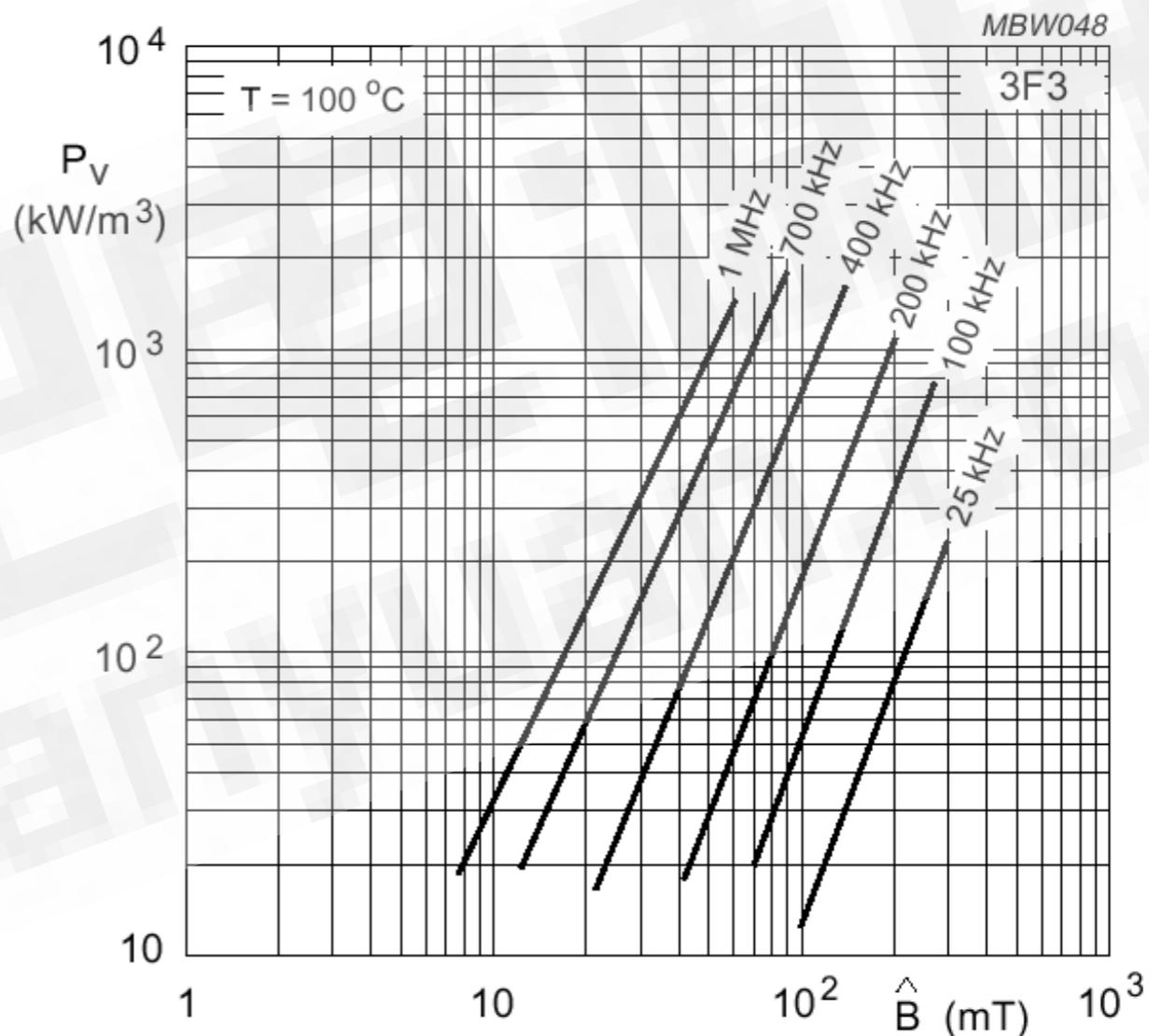


磁芯损耗影响因素:

- ❖ 材质
- ❖ 励磁频率
- ❖ 磁通密度
- ❖ 温度
- ❖ 偏磁
- ❖ 励磁波形



铁氧体材料的损耗-温度特性



			饱和 Bs	剩磁 Br	初始磁 导率 μ_i	增量磁 导率 μ_Δ	幅值磁 导率 μ_a	损耗 Pc
变压器		正激变压器	√	×	×	×	√	√
		反激变压器	√√	√	×	×	√	√
电感器	 	直流电感器	√	×	×	√	×	√
		谐振电感器	√	×	×	×	√	√
		PFC电感器	√√	×	×	×	√	√
滤波器	 	差模电感	√√	×	√	×	×	×
		共模电感	×	×	√	×	×	×



软磁磁心材料

❖ 粉芯磁材料(粉材)

- Fe (铁粉芯)
- MPP (铁镍铝合金)
- High Flux (高磁通铁镍合金)
- Kool Mu (铁硅铝合金)
- Fe-Si (铁硅合金)

❖ 铁氧化物磁材料(块材)

- Mn-Zn
- Ni-Zn

❖ 非晶磁材料(带材)

- Silicon steel (硅钢片)
- Permalloy (坡莫合金)
- Amorphous (非晶)
- Nanocrystal (纳米晶)



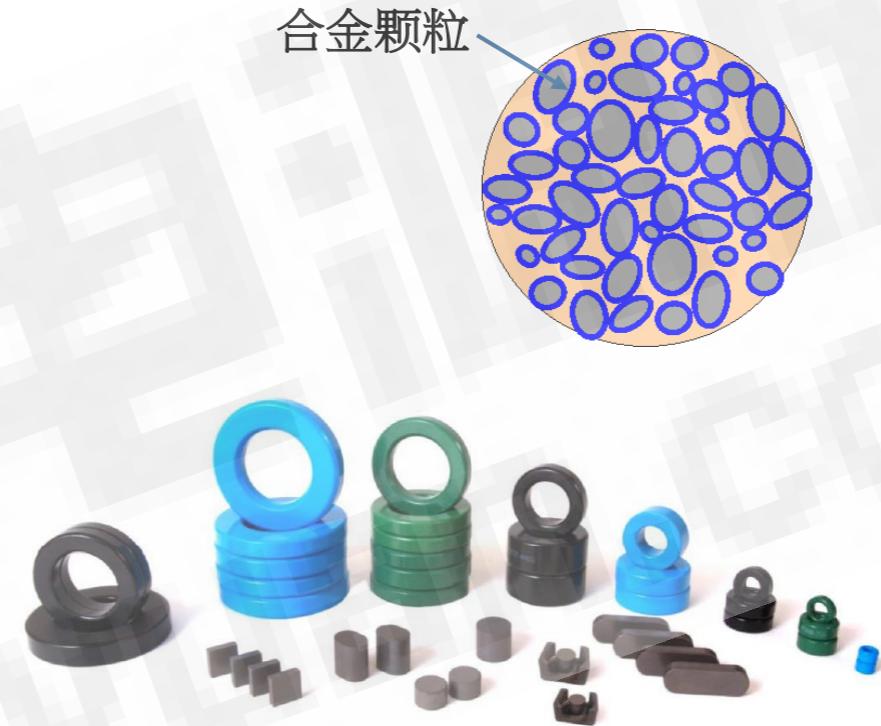
❖ 粉心磁材料(粉材)

磁粉心是由软磁合金粉末通过绝缘包覆压制而成。其磁路由软磁合金粉末和分布式气隙两部分组成。

合金冶炼→制粉→粉处理→配料→绝缘包覆→压制→烧结与处理→性能检测→浸溶→干燥→涂覆

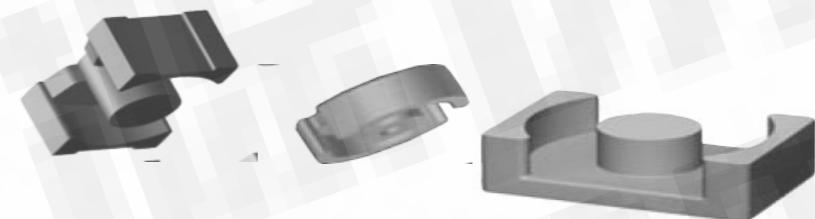
- 高饱和磁密
- 良好的直流偏磁特性
- 良好的温度稳定性
- 较小的绕组损耗
- 磁通不均匀→较大的磁心损耗
- 合金粉末颗粒→较大的涡流
- 分布气隙→较低的磁导率

应用：功率电感



❖ 铁氧体磁材料(块材)

由 Fe_2O_3 和其他二价的金属氧化物(如 NiO , ZnO)等粉末混合烧结而成。



铁氧体
磁材料

Mn-Zn Ferrite ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO} + \text{ZnO}$):

相对较高的磁导率, 相对较低的电阻率, 相对较大的涡流损耗;

Ni-Zn Ferrite ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{NiO} + \text{ZnO}$):

相对较低的磁导率, 相对较高的电阻率, 相对较高的磁滞损耗;

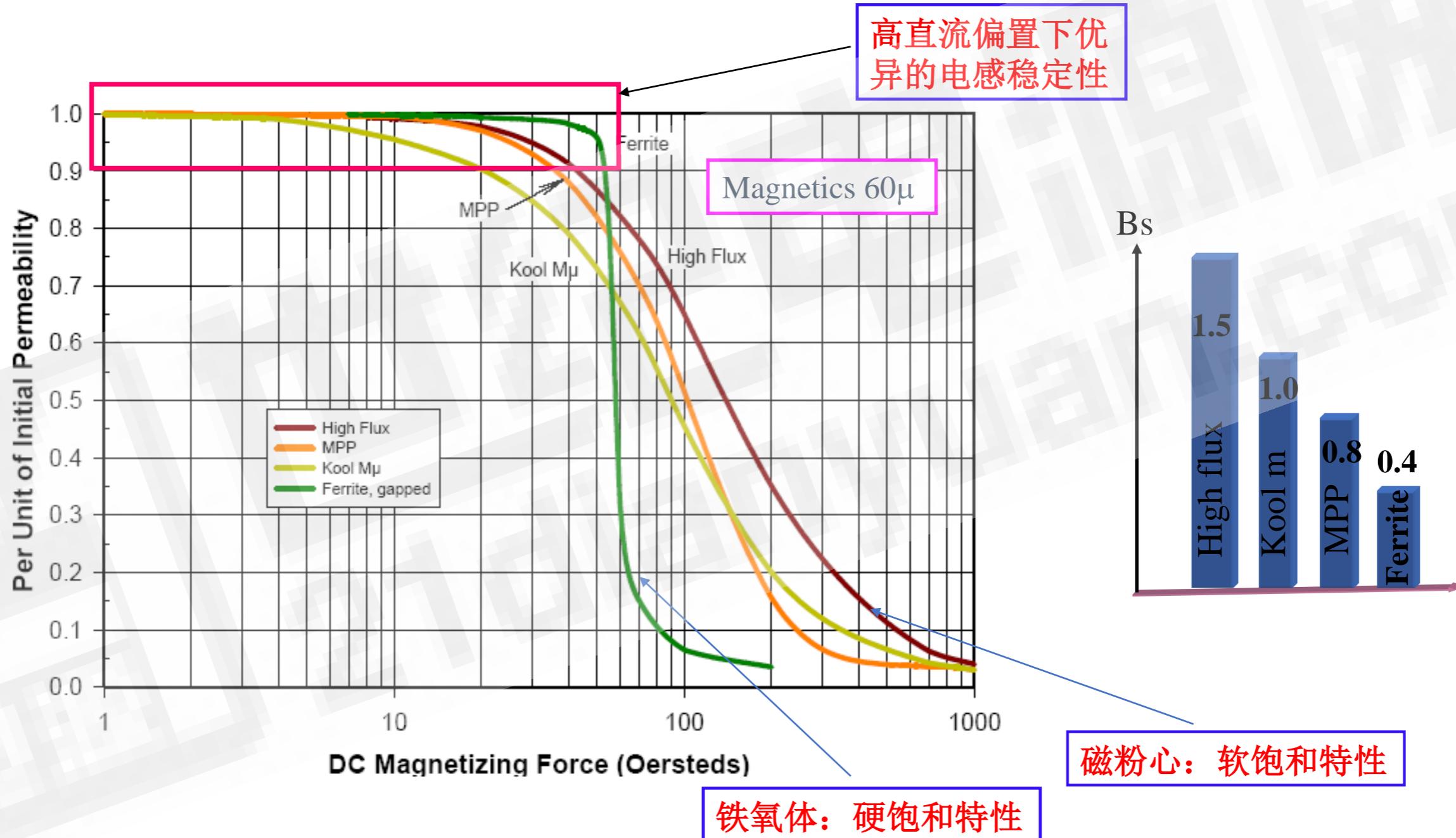
□ 低饱和磁密

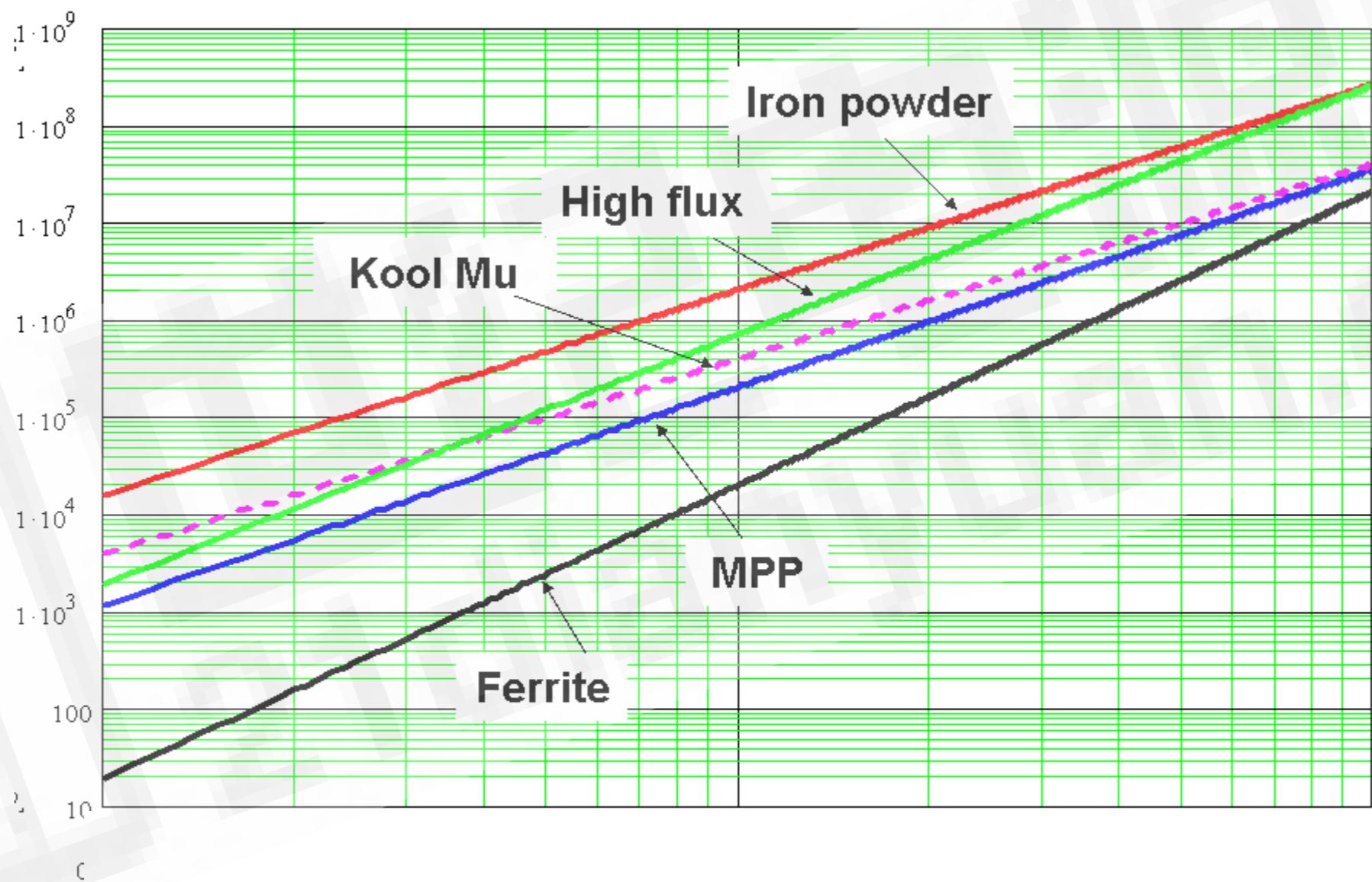
□ 弱的直流偏磁特性

□ 高磁导率、高电阻率、适合高频应用

□ 功率电感(开气隙)应注意扩散磁通损耗

主要应用: 高频变压器、功率电感(开气隙)、EMI滤波电感器



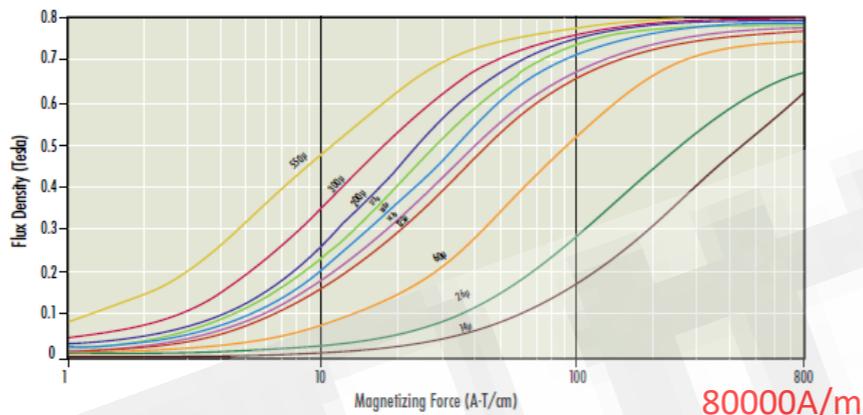


Frequency: 60kHz

磁化曲线B-H

Normal Magnetization Curves

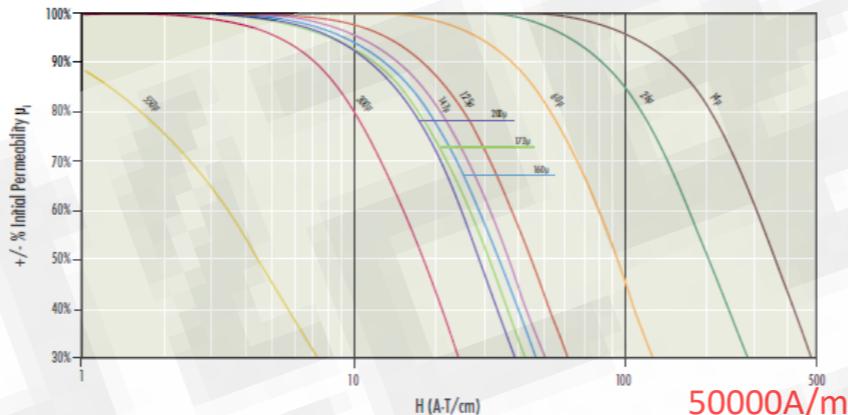
MPP



偏磁磁导率 μ_{Δ} -H

Permeability versus DC Bias Curves

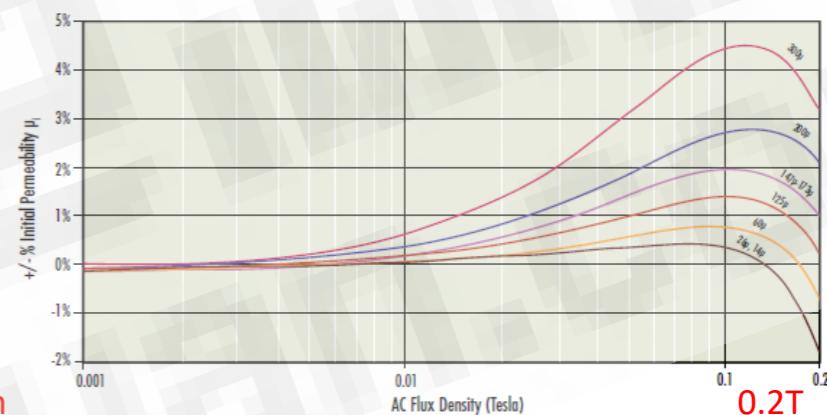
MPP



幅值磁导率 μ_a - B_{ac}

Permeability versus AC Flux Curves

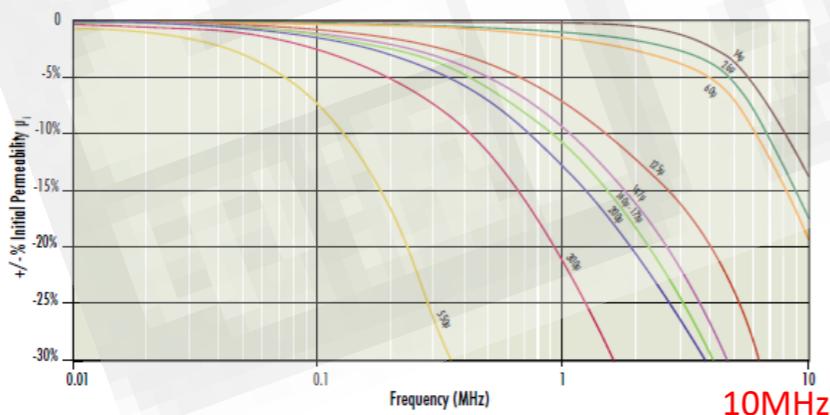
MPP (14 μ - 300 μ)



磁导率 μ_i -f

Permeability versus Frequency Curves

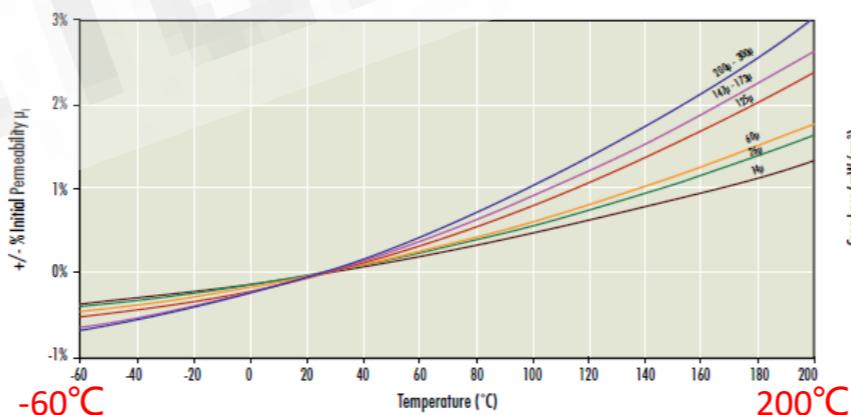
MPP



磁导率 μ_i -T

Permeability versus Temperature Curves

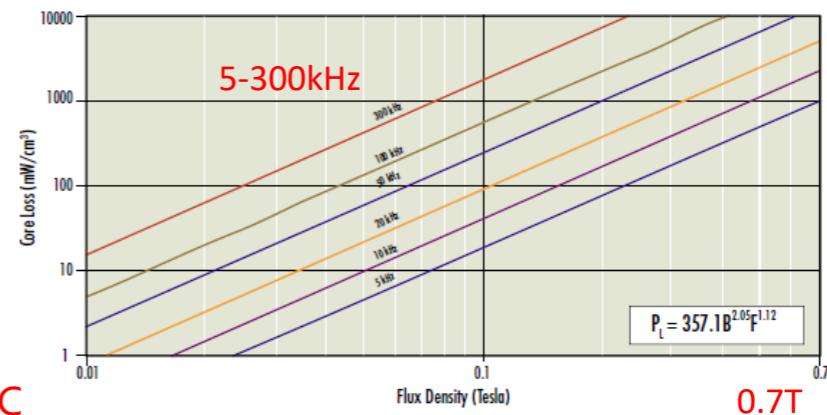
MPP (14 μ -300 μ)



损耗 P_{cv} - f, B_{ac}

Core Loss Density Curves

MPP 60 μ



MPP (铁镍铝合金)

- 低磁滞、低涡流、粉心磁材中损耗最低；
- 饱和曲线温度特性好；
- 高直流偏置下优异的电感稳定性；

High Flux (高磁通铁镍合金)

- 粉心磁材中较高的偏磁能力；
- 饱和磁密约为MPP的1.5-2倍，铁氧体的3倍以上采用High Flux磁粉心的电感器尺寸更小；
- 高直流偏置下优异的电感稳定性；

Kool Mu (铁硅铝合金)

- 磁致伸缩系数接近于0，有利于减小滤波电感高频噪声；
- 高直流偏置下较好的电感稳定性；

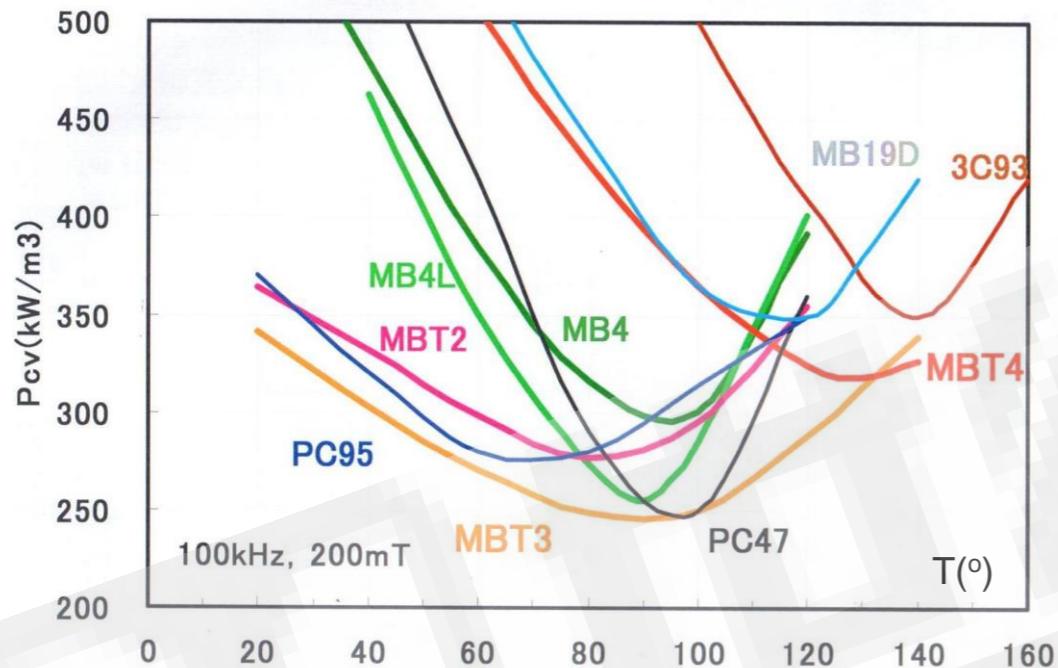
Fe-Si (铁硅)

- 损耗大；
- 粉心磁材中较高的偏置能力；

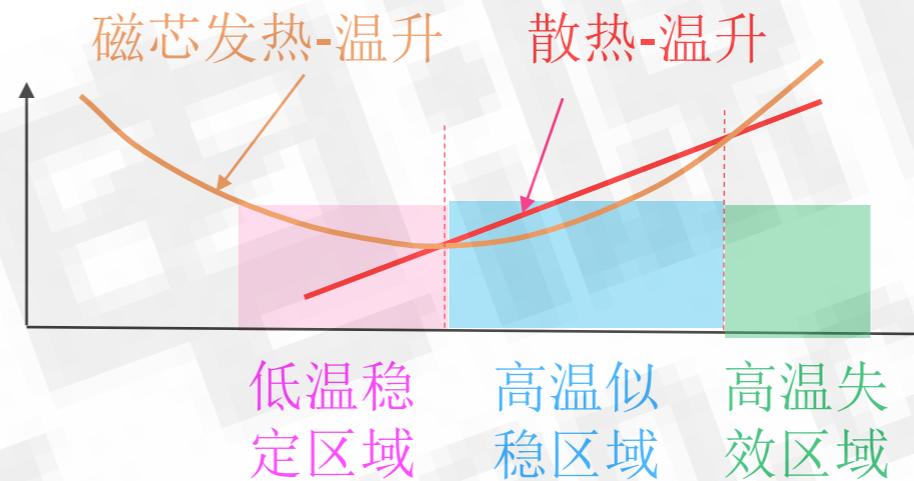
Fe (铁粉芯)

- 损耗大；
- 使用有机粘结剂，热老化现象；

		Kool Mu	Fe-Si	High Flux	MPP
合金组分		铁硅铝	铁硅	铁镍	铁镍铝
可选磁导率		14-125	26-90	14-160	14-550
磁芯损耗- 60 μ (mW/cc)	50 kHz, 1000 G	214	590	333	174*
	100 kHz, 1000 G	550	1,350	900	450*
磁导率vs.直流偏置特性- 60 μ (AT/cm)	80% μ_i	34	76*	69	48
	50% μ_i	76	131*	131	84
60 μ 度稳定性(-60至200°C温度条件下的典型% 偏差)		7%	5%	4%	2.5%
居里温度		500°C	700°C	500°C	460°C
饱和磁通密度 (Tesla)		1.0	1.6	1.5	0.8
频率响应(60 μ 压平至...)		900 kHz	500 kHz	1 MHz	2MHz
相对成本		1*	1.2x	4x-6x	7x-9x

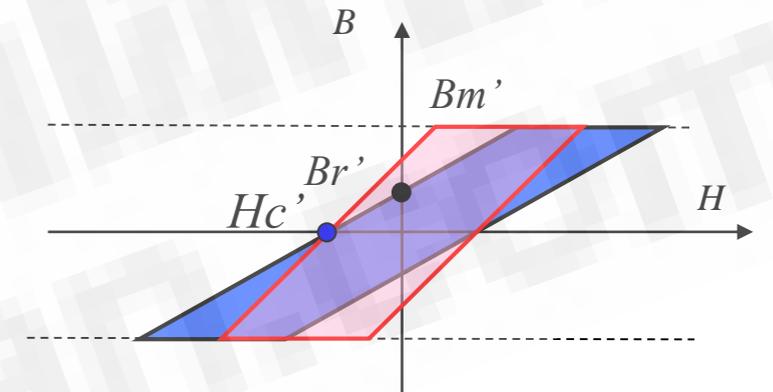
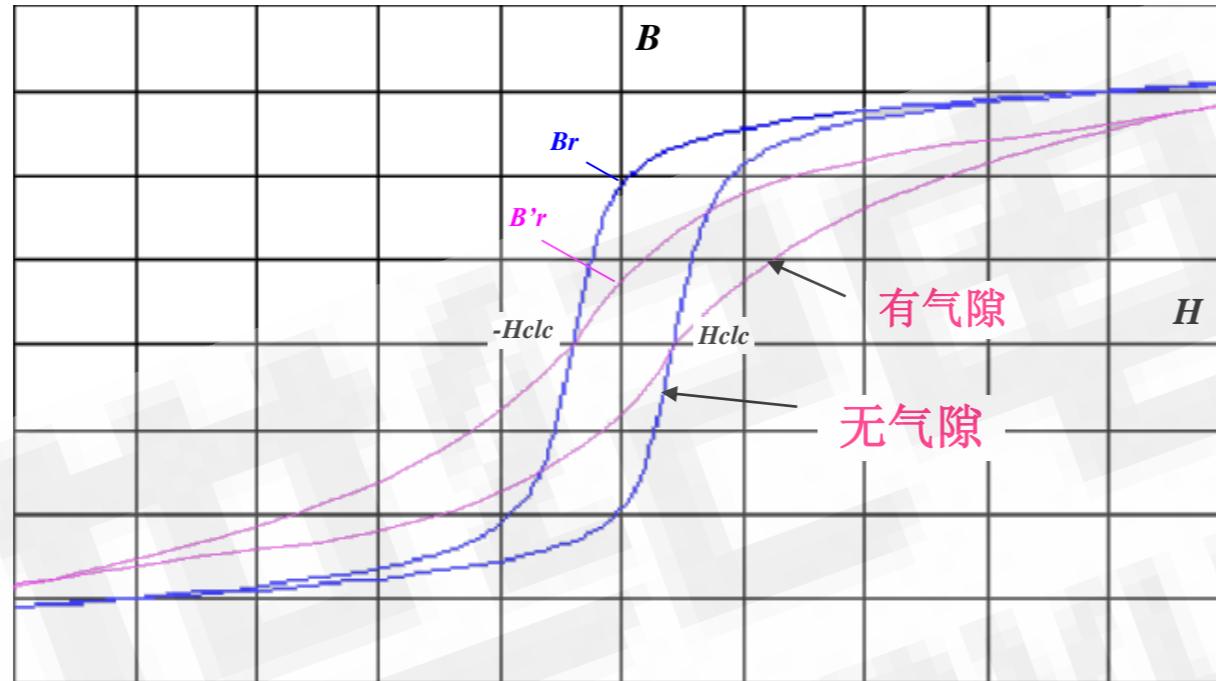
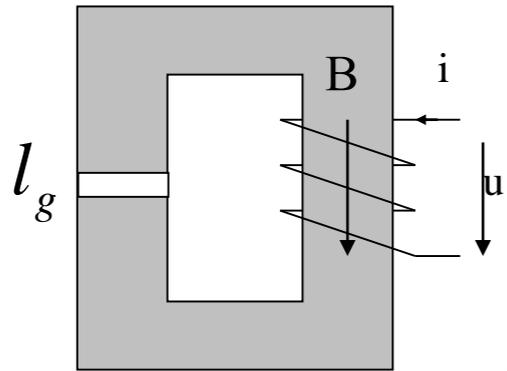


铁氧体材料温升-损耗特性



利用浴盆曲线特性，将温度设计在损耗最低点
但浴盆曲线特性也容易造成温升的失控
在高频下磁芯温升成为主要限制因素

- 为了提高功率密度，磁芯最小损耗温度点向高温化发展；
- 频率提高，磁芯损耗密度增大，进入高温似稳区域，增加热设计难度；
- 磁芯的发热温升模型与散热设计成为可靠性制约因素。



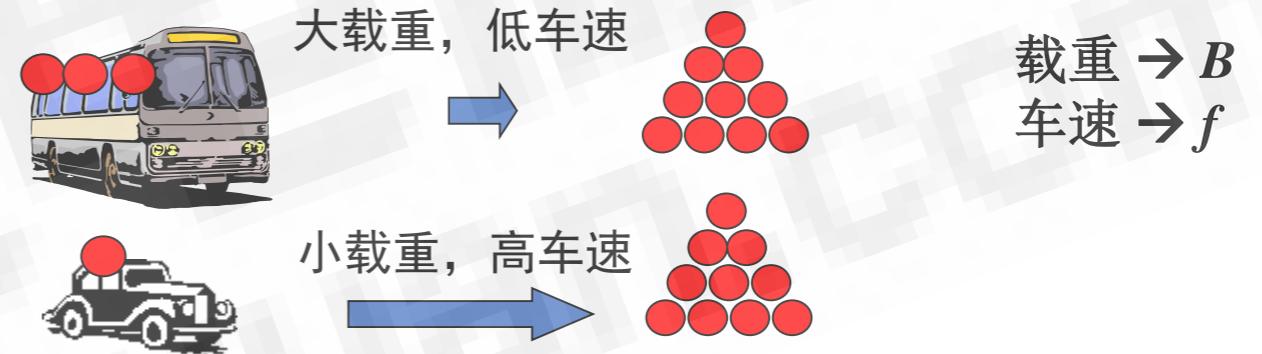
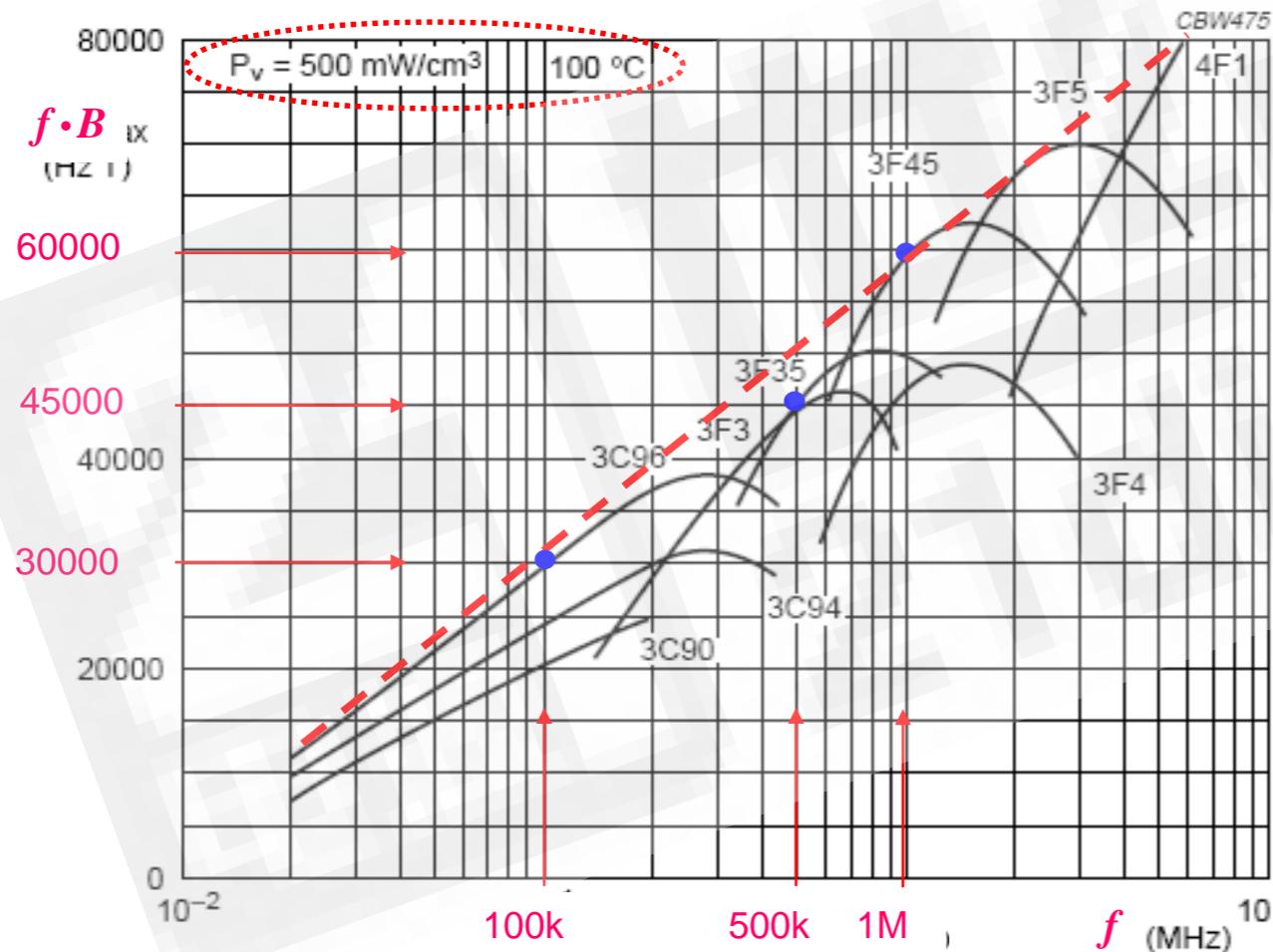
- ❖ 磁芯磁导率的一致性差 (+/- 20-25%)
- ❖ 加气隙后，有效磁导率明显下降
- ❖ 但有气隙后，有效磁导率 μ_e 稳定性提高
- ❖ 降低剩磁磁密 B_r 以保证单向励磁的振幅
- ❖ 储存适当磁场能量以抵抗微小偏磁

$$\mu_e = \frac{\mu_c}{1 + \frac{l_g}{l_c} \frac{\mu_c}{\mu_0}}$$

$$B_r' = B_r \cdot \frac{\mu_e}{\mu_c}$$

$$P_{\text{传输磁能}} = V \cdot I = f \cdot \Psi \cdot I = f \cdot (B \cdot A_e \cdot N) \cdot I \propto f \cdot B$$

$(f \cdot B)$ 磁材料性能因子：在一定功耗下传输磁能的能力



从磁密限制上看：
如 f 增大一倍， B 不变，则 A 可降低一半

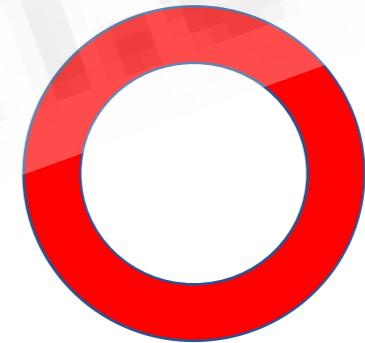
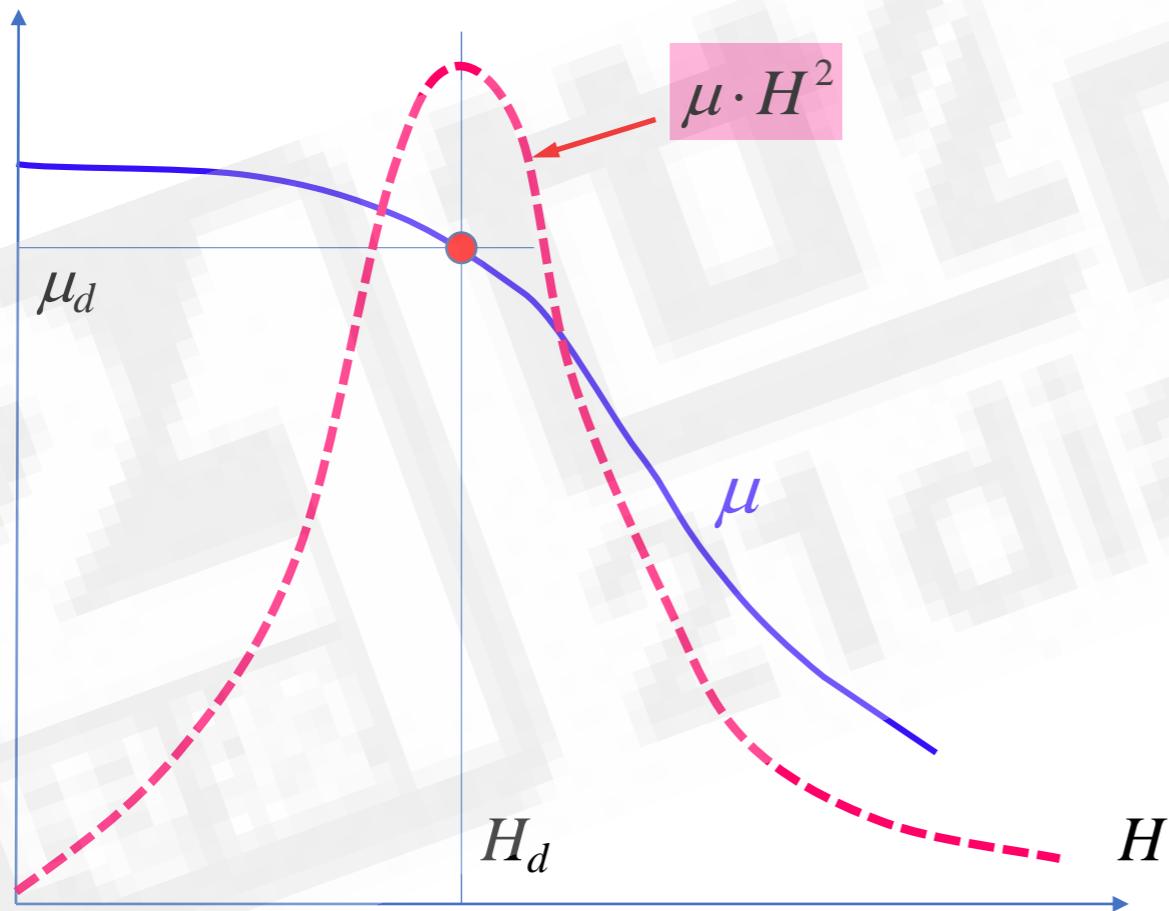
从损耗限制上看：
如 f 增大一倍，则 $(f \cdot B)$ 没能增大一倍

在低频下：饱和是主要限制因素
在高频下：损耗是主要限制因素

$$E_{\text{储能}} = \frac{1}{2} L \cdot I^2 = \frac{1}{2} B \cdot H \cdot V_e \propto \mu \cdot H^2$$

$(\mu \cdot H^2)$: 磁材料储能因子

对低磁导率的磁粉芯电感

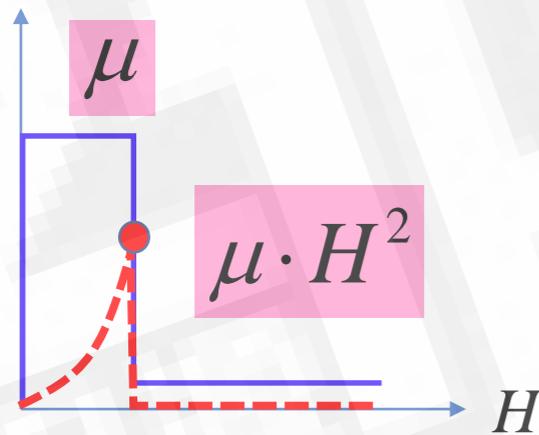
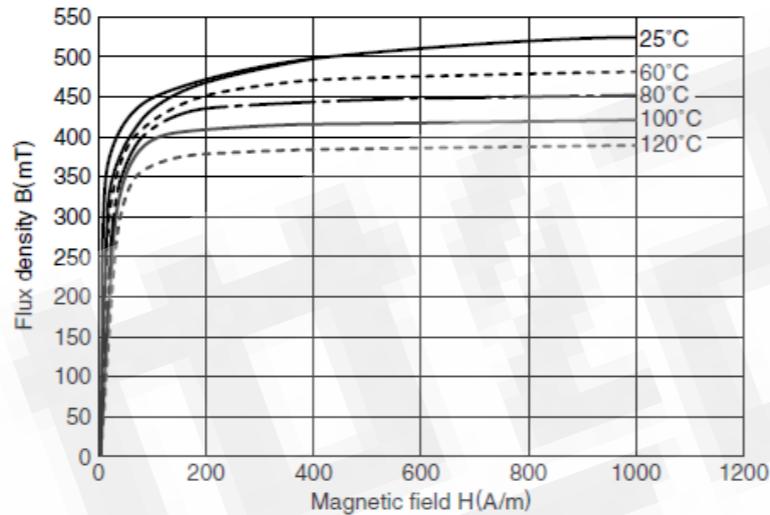
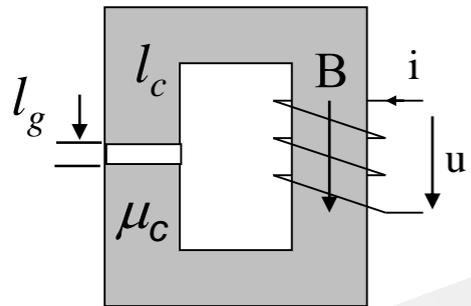


$$H_d \cdot l_e = N \cdot I$$

$$L = \frac{\mu_d \cdot N^2 \cdot A_e}{l_e}$$

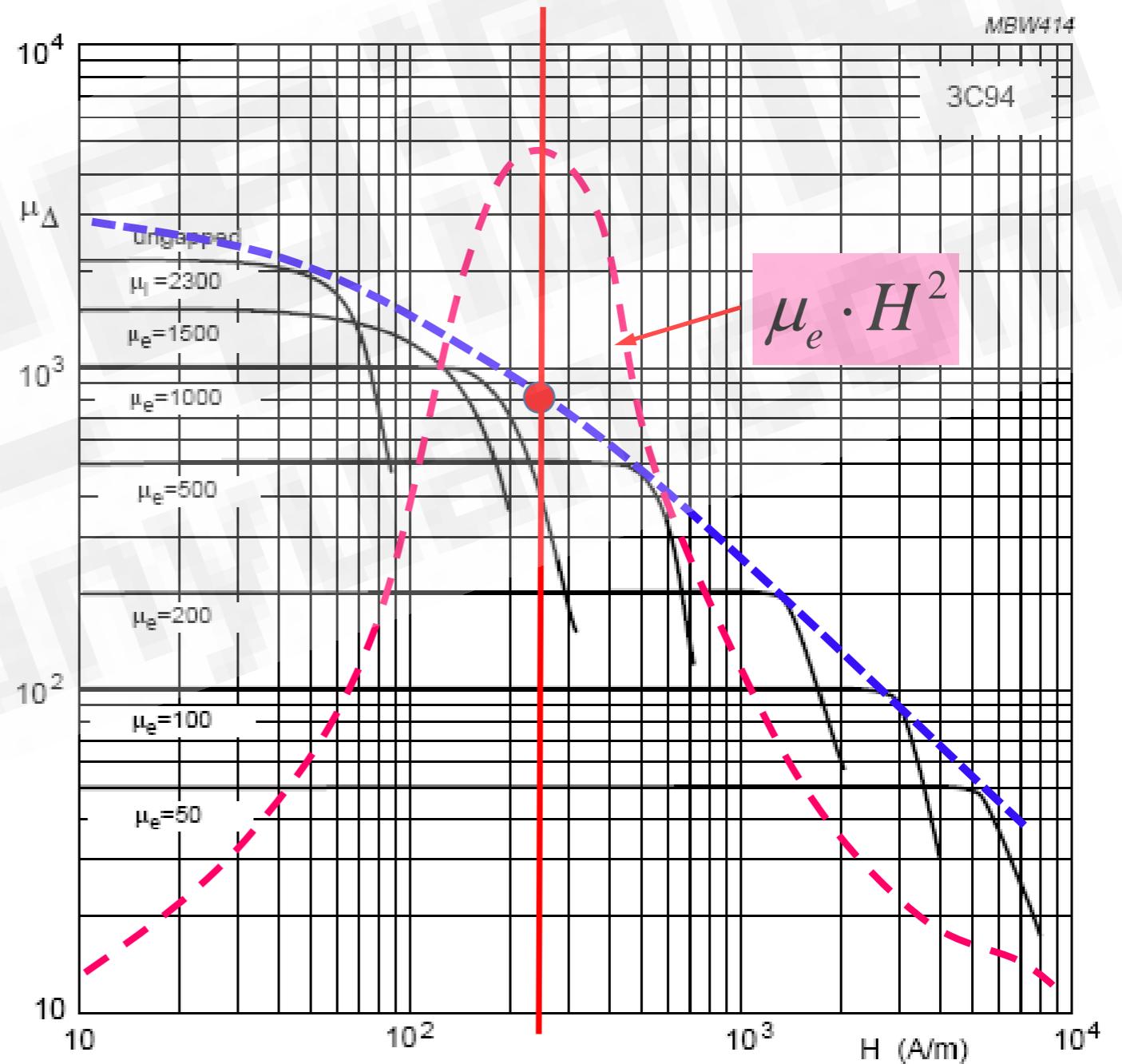
N, A_e, l_e

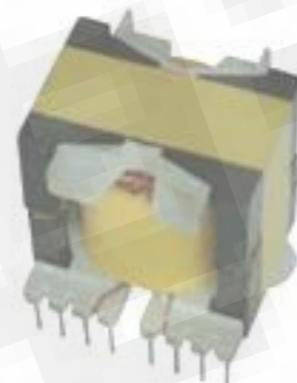
对铁氧体加气隙的电感磁芯



$$\mu_e = \frac{\mu_c}{1 + \frac{l_g}{l_c} \frac{\mu_c}{\mu_0}}$$

对线性磁芯，很容易确定设计点

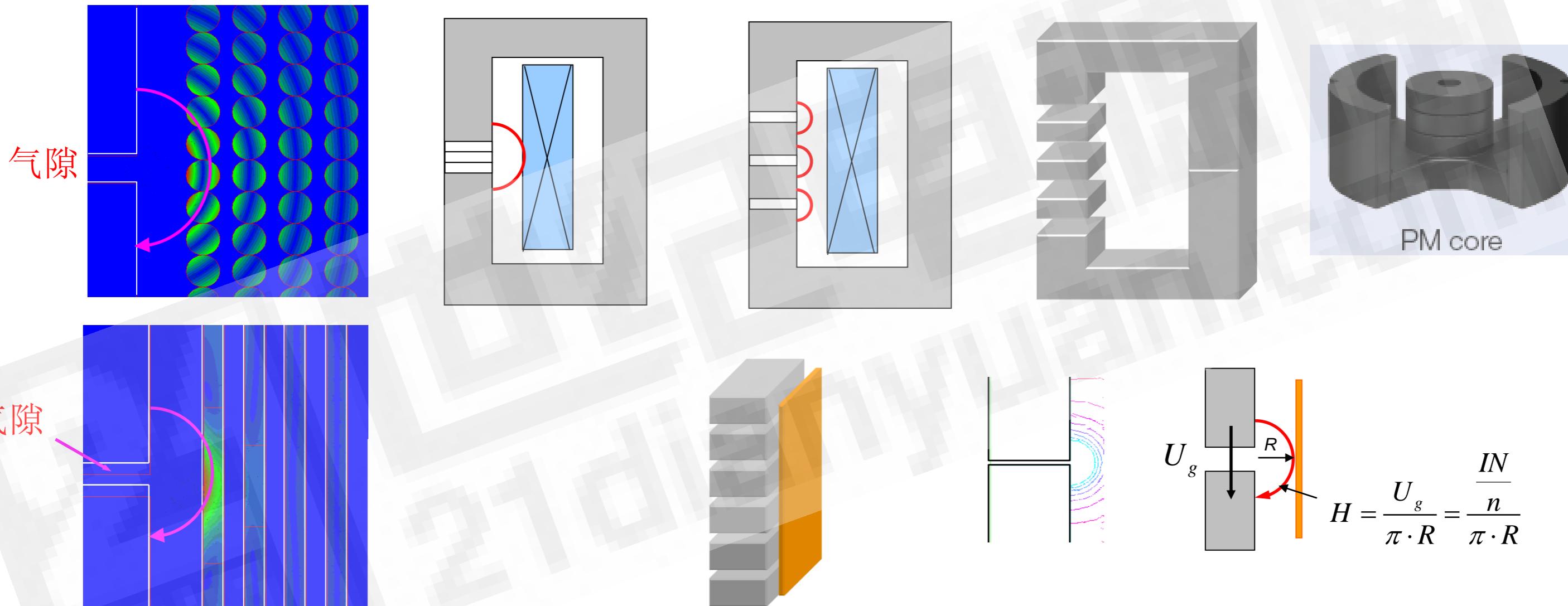




- ☹️ 制造困难
- ☹️ 磁场泄露较大
- ☹️ 低导体填充率
- ☹️ 一致性差
- ☹️ 屏蔽困难
- ☹️ 设计困难
- 😊 尺寸小
- 😊 绕组匝长小
- 😊 没有气隙扩散效应

- 😊 制造容易
- 😊 磁场泄露小
- 😊 导体填充率大
- 😊 一致性好
- 😊 屏蔽容易
- 😊 设计容易
- ☹️ 尺寸大
- ☹️ 绕组匝长大
- ☹️ 气隙扩散效应大

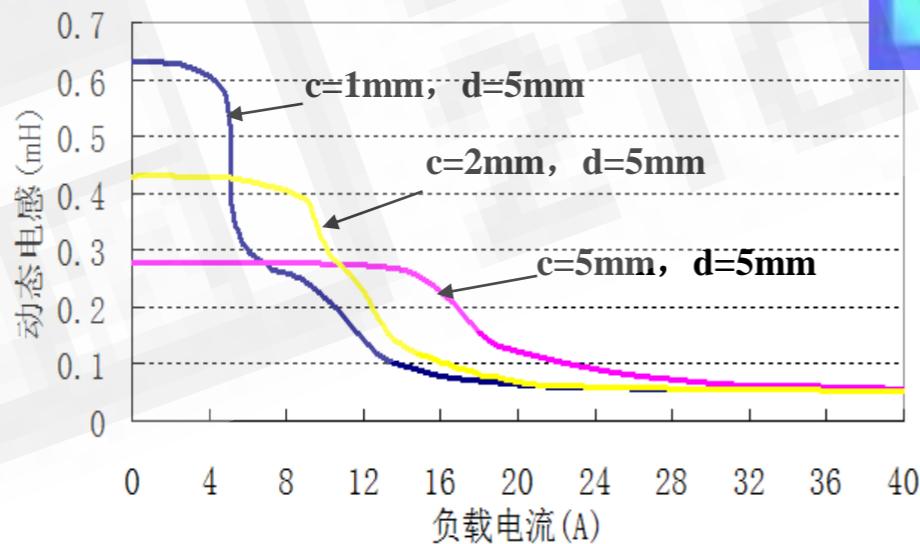
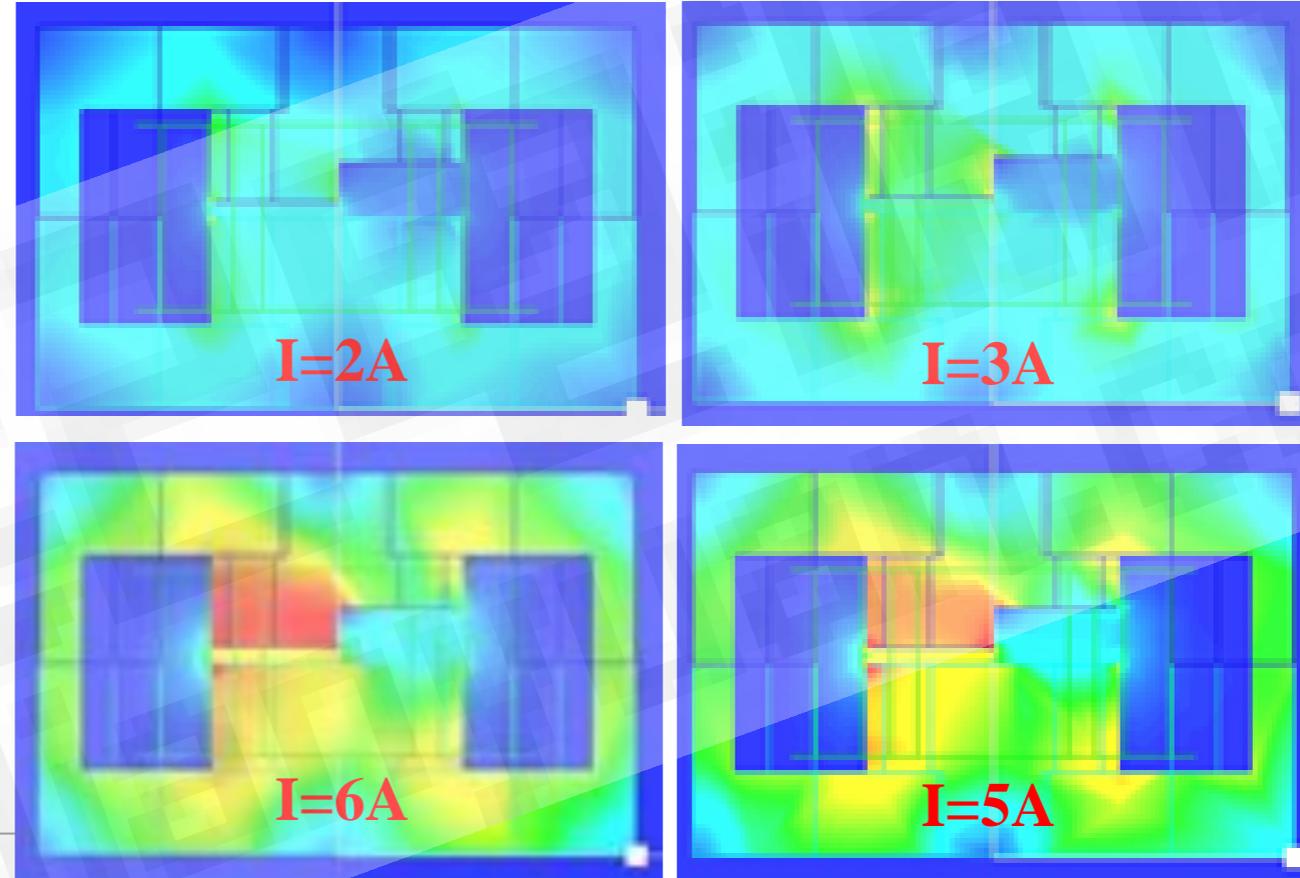
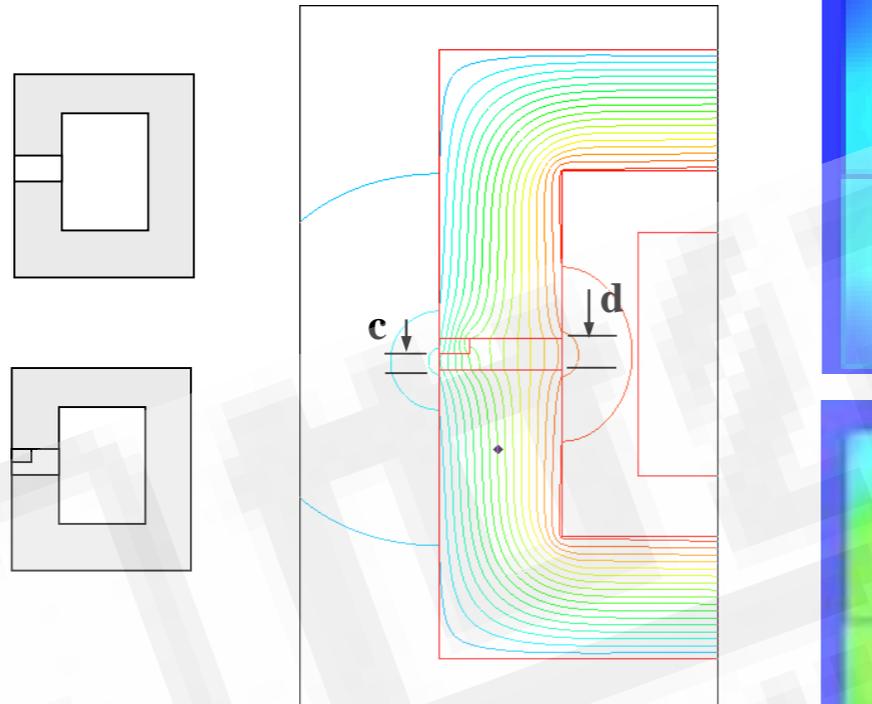
分布气隙降低气隙扩散损耗



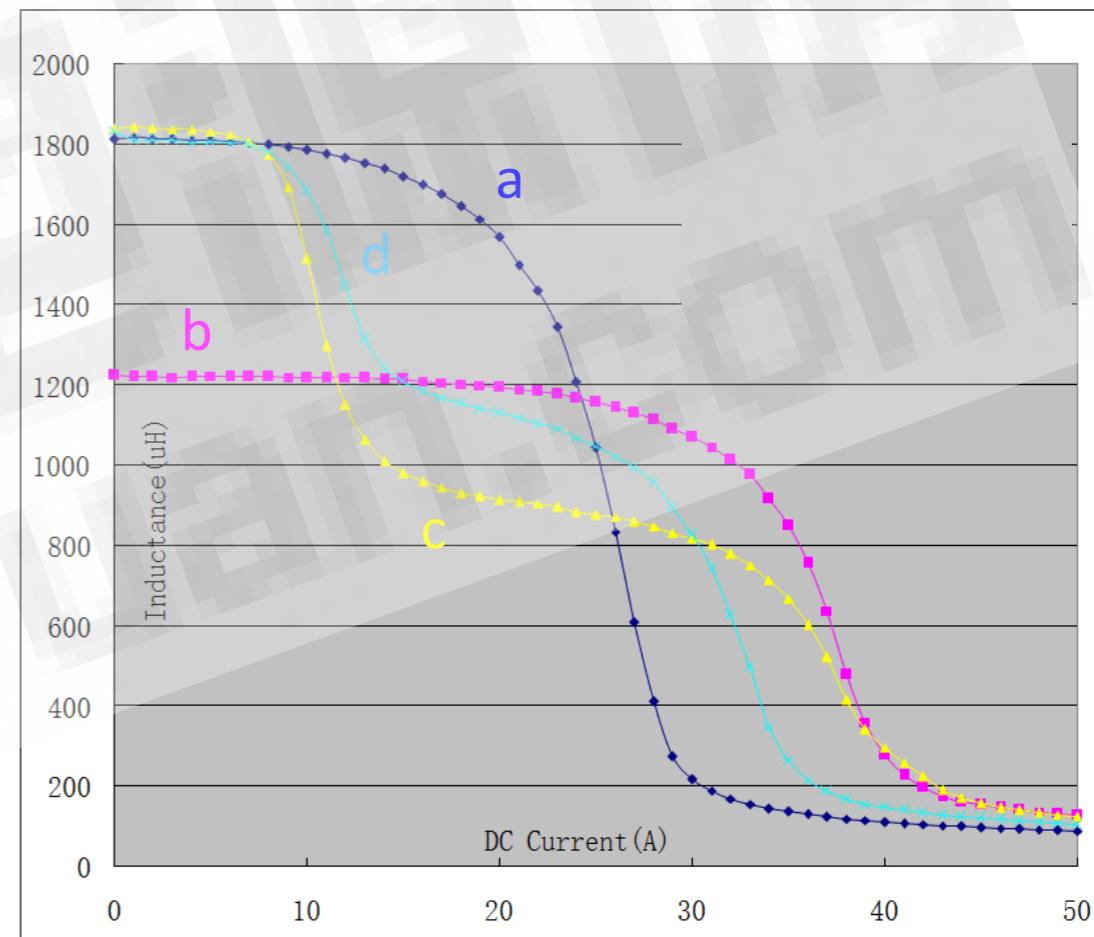
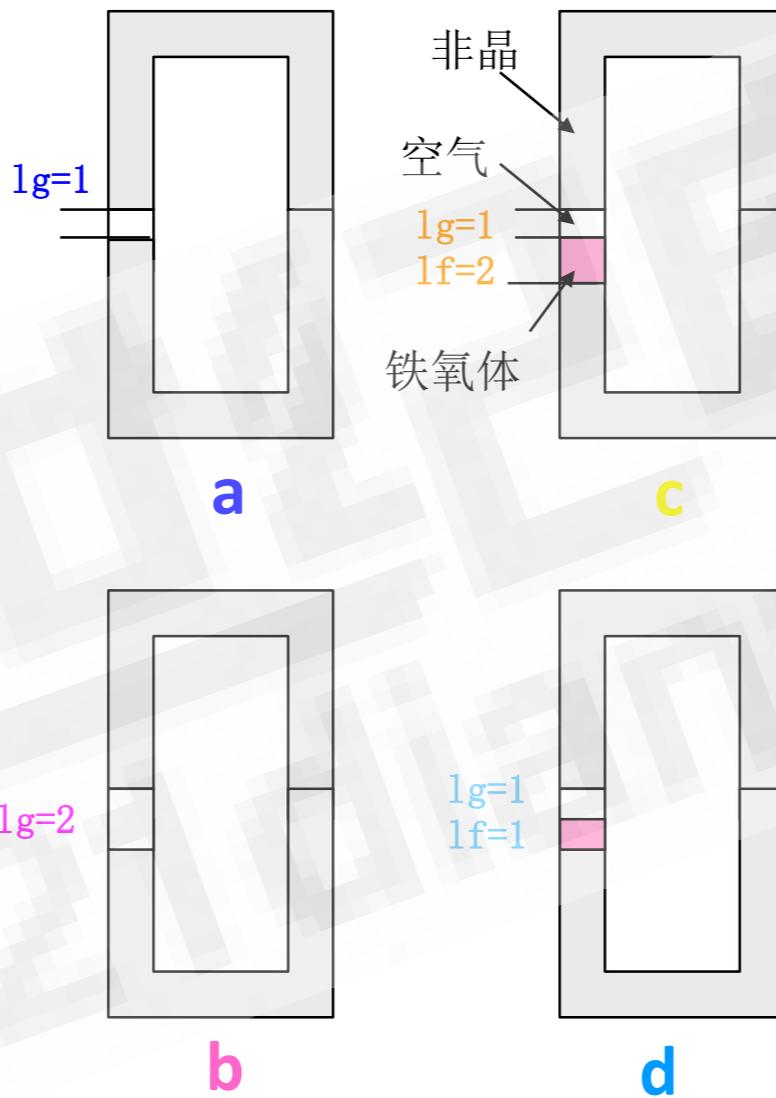
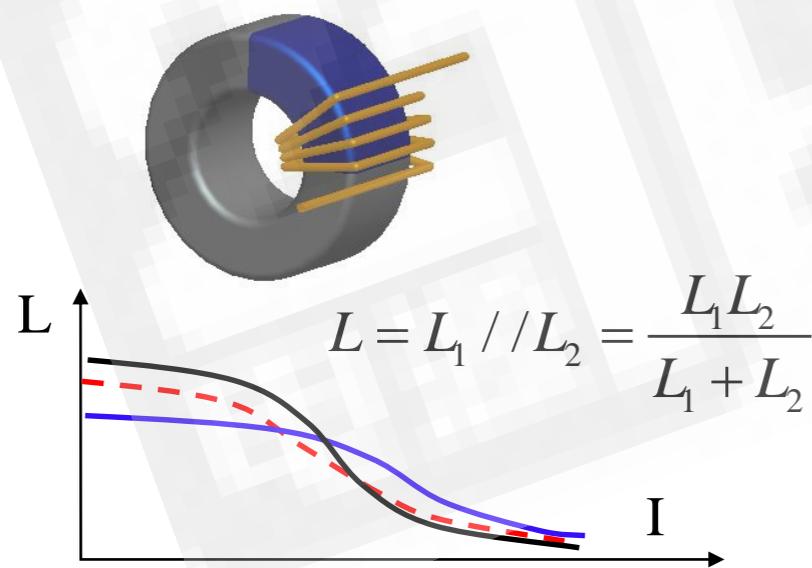
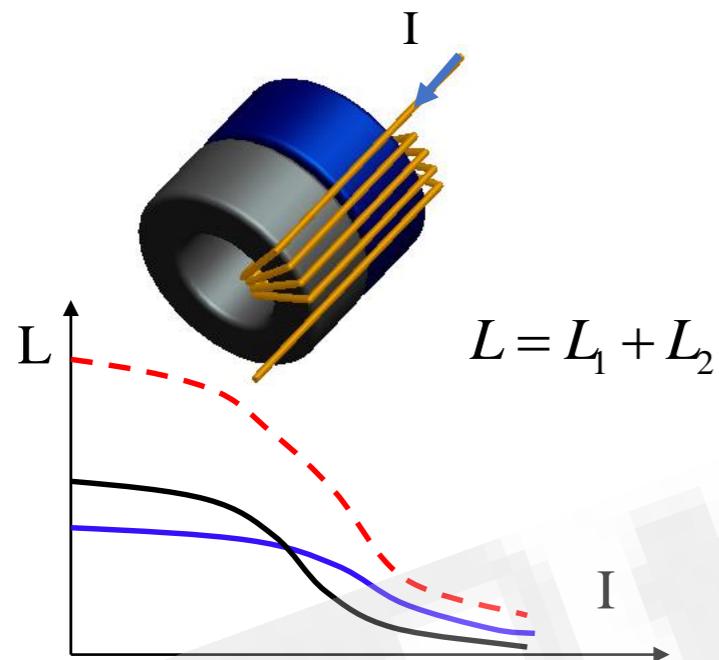
$$H = \frac{U_g}{\pi \cdot R} = \frac{IN}{\pi \cdot R}$$

气隙扩散磁通损耗 $\propto n \cdot H^2 \propto 1/n$

分布气隙结构 → 气隙磁压降低，扩散磁通影响范围减小

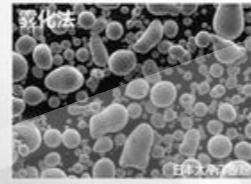
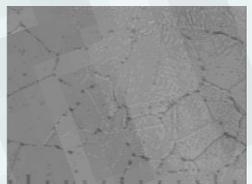
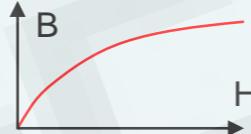
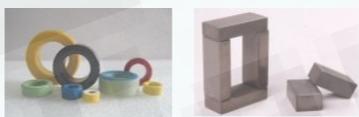


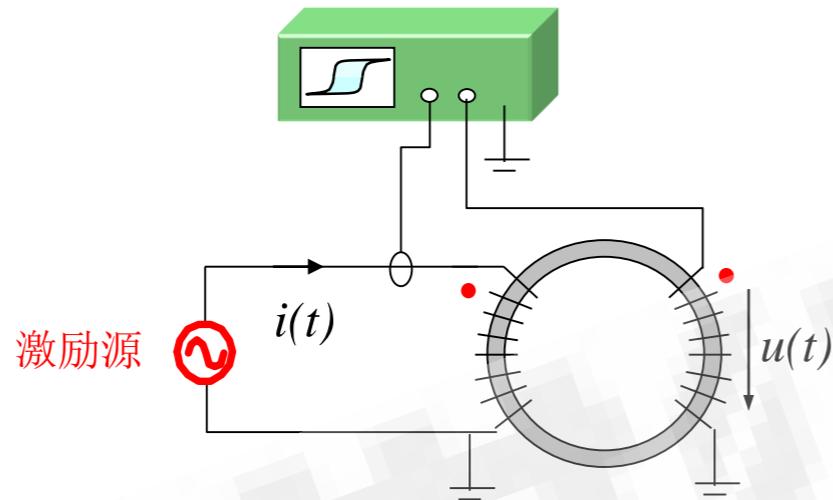
❖ 需要仔细设计台阶参数，以获得需要的最佳的非线性电感负载特性



- ❖ 高工作频率已经成为主要发展趋势 (铁氧体 $> \text{MHz}$)
- ❖ 低损耗的粉芯材料已经广泛应用 (磁粉芯 $> 200\text{-}300\text{kHz}$)
- ❖ PWM波下的磁芯损耗测试与开关电源的工况更吻合



	磁粉芯	铁氧体
定义	金属磁粉+ 绝缘涂层+空气 	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + (\text{Ni-Zn}, \text{Mn-Zn})$ 氧化 
用途	电感	变压器、电感(加气隙)、EMI滤波器
饱和	高Bs 软饱和 	低Bs 硬饱和 
参数	μ_{Δ} 、 μ_a 、 B_s 、 P_{cv}	μ_i 、 μ_a 、 B_s 、 P_{cv}
磁芯形态	环形、块 	多样 
μ	低 (26-125)	高 (>2000)
激磁电源	大功率 (大电压且大电流)	小功率 (大电压但小电流)
测试匝数	同时考虑电压和电流 $V = \sqrt{2}\pi f \cdot N \cdot A \cdot B_m$ $I = B_m \cdot l_e / \sqrt{2}(\mu \cdot N)$	只考虑电压 $V = \sqrt{2}\pi f \cdot N \cdot A \cdot B_m$
阻抗角	很大 (>89°)	较小 (<85°)



磁粉芯: $\mu_e = 26-125$
铁氧体: $\mu_e > 2000$



26.9x14.7x11.2mm

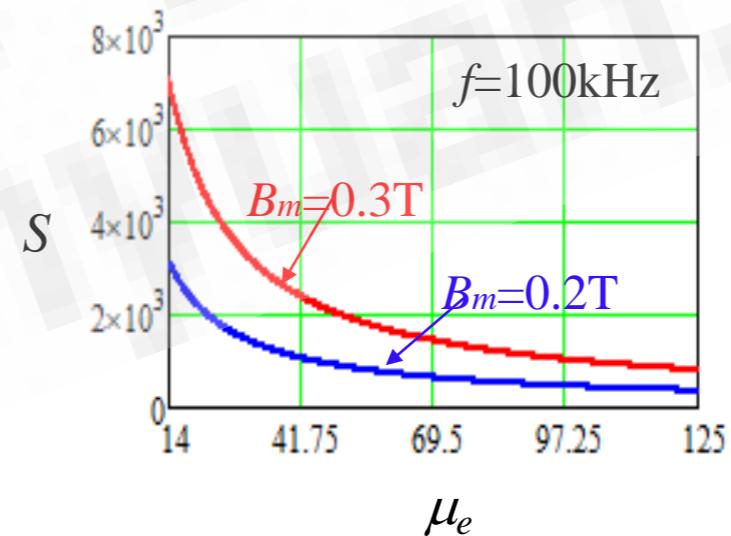
OD/ID=1.83

$$V_{rms} = \sqrt{2} \pi \cdot f \cdot N \cdot A \cdot B_m$$

$$I_{rms} = B_m \cdot l_e / (\sqrt{2} \mu_0 \mu_e \cdot N)$$

↓

$$S = V \cdot I = \pi f \cdot \frac{B_m^2}{\mu_0 \mu_e} \cdot V_e$$



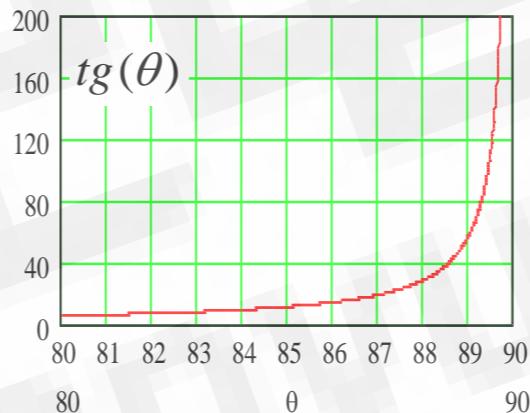
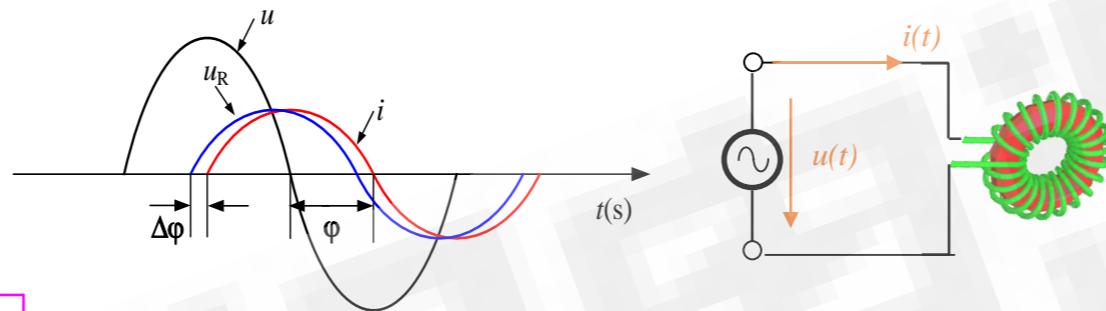
$$V_e = 4.43 \text{E-}6$$

对于磁粉芯，由于 μ_e 较小、 B_s 大，使其参数测量时所需的激励源的容量远大于铁氧体。

$$P = U \cdot I \cdot \cos\theta$$

$$\frac{\Delta P}{P} = \left| \frac{\Delta U}{U} \right| + \left| \frac{\Delta I}{I} \right| + \boxed{tg(\theta)\Delta\theta}$$

$$= \left| \frac{\Delta U}{U} \right| + \left| \frac{\Delta I}{I} \right| + \boxed{tg(\theta)(\Delta t \cdot f)}$$



$\left| \frac{\Delta U}{U} \right|, \left| \frac{\Delta I}{I} \right|$ 精度非常高

$tg(\theta)(\Delta t \cdot f)$ 主要影响因素



- ❑ 大信号激励源 → 电压通道与电流通道的同步时间误差 Δt 难以完全消除
- ❑ 高频测试场合中 → $\Delta\theta = \Delta t * f$
- ❑ 阻抗角大 → θ 接近 90° , $tg(\theta)$ 很大

阻抗角

f	B	阻抗角	
		60:5	60:60
5kHz	10mT	89.76	89.83
	50mT	89.61	89.59
	100mT	89.54	89.52
10kHz	50mT	89.58	89.54
	100mT	89.47	89.59
	20kHz	10mT	89.75
20kHz	50mT	89.47	89.59
	100mT	89.42	89.53
	50kHz	10mT	89.65
50kHz	50mT	89.36	89.56
	100mT		
	100kHz	10mT	89.41
100kHz	50mT		
	100mT		
	200kHz	10mT	89.13
200kHz	50mT		
	100mT		

样品: FeSiAl60 D1-1

仪器: Iwatsu SY8216 B-H Analyzer

磁粉芯: $\theta > 89^\circ$
铁氧体: $\theta < 85^\circ$

- ❑ 磁粉芯的磁芯损耗测量误差大的主要原因是: 大阻抗角 ($>89^\circ$)
- ❑ 铁氧体的磁芯损耗测量误差大的主要原因是: 高频率 ($>MHz$)



福州大学
FUZHOU UNIVERSITY

谢谢!

21dianyuan.com